

训练2

扬声器振膜的振动与辐射行为

1 训练目标

- 了解在高频段模拟扬声器所采用的分布参数需求
- 在电声换能器上应用激光扫描技术
- 解释模态分析的结果
- 复习声波辐射与传播的基本理论
- 完成声波辐射的分析
- 培养扬声器诊断技能以评估其品质和设计选择

2 要求

2.1 知识背景

建议训练前先行完成训练1: Klippel Training1 “Linear Lumped Parameter Measurement”。

2.2 最低要求

本次训练的目的在于利用 Klippel database (.ksp)所提供的测量结果完成本次训练,而不需要使用 KLIPPEL 测量硬件。从 www.klippel.de/training 网站下载 SCN Analysis Software(2.0.11版本及以上)和测量软件 dB-Lab 并且安装在电脑上,以此观察数据。

2.3 可选要求

如果实验人员有 KLIPPEL R&D 测量系统,建议能使用指导老师或者其他实验者提供的换能器进行更多的测试。为了能完成这些测试,可能需要以下的软件和硬件:

- 扫描控制硬件
- 3D 扫描器
- 失真分析仪 DA2
- 激光传感器+控制器
- 放大器
- 固定支架

3 训练过程

1. 阅读下面的理论知识,获得训练相关的知识。
2. 观看演示视频来学习实际测量部分。
3. 回答准备问题来检验理解程度。
4. 根据教程来解读数据库中的结果,并且离线回答多选题。
5. 上传你的答案到 www.klippel.de/training 的匿名评分系统。
6. 获得一封包含有学习证明的邮件 Certificate of Mastery, Knowledge or Participation (根据表现进行评分)。
7. 有硬件条件下完成一些换能器测试。

4 简介

在低频段，扬声器的驱动与机械系统可利用集中参数的等效电路加以模拟。在端口的电信号(电压 u 与电流 i)产生电动力(F_{coil})，进而驱动振动质量(M_{ms})、悬挂系统的刚性(K_{ms})以及机械阻抗(R_{ms})，从而产生音圈速度(v_{coil})。在一维的信号路径中，电信号(如电压 u)与机械信号(如速度 v)描述了声音信号的转换 (训练1)。在高频段，为了描述振膜和悬挂系统的震动情况，需要一个包含了许多参数和状态变量的分布参数模型。在辐射面积上任一点($\mathbf{r}_c$)的法向速度($v(\mathbf{r}_c)$)分别在近场和远场产生声压 $p(\mathbf{r}_n)$ 与 $p(\mathbf{r}_a)$ 。

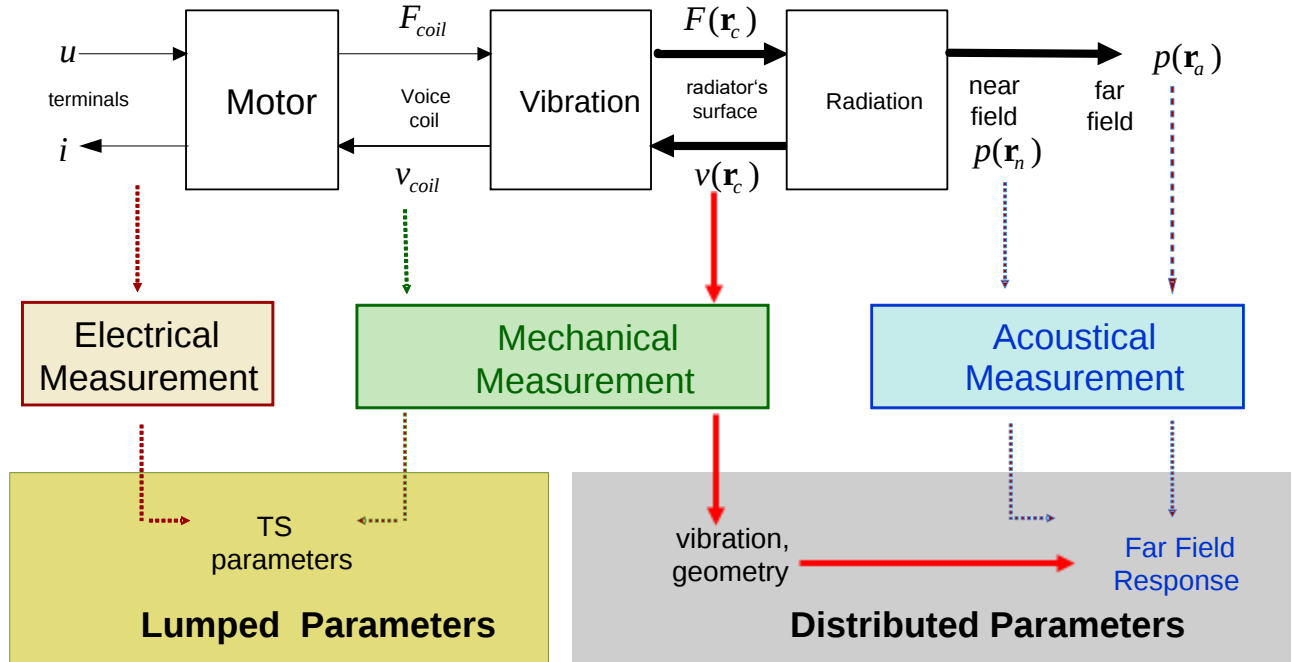


图1: 扬声器参数

虽然机械振动在声音的播放上扮演着一个重要的角色，但是在过去对它的测量比对电输入信号和声音输出信号的测量更困难。现代激光扫描技术能够高精度测量机械振动和振膜的几何尺寸。SCN Analysis Software 可以将测量数据可视化，这提供了对锥形振膜振动的新分析方法并且可以预估辐射声压。

4.1 位移传递函数

激光扫描仪给出扬声器终端电压(u)和在辐射面上任意位置($\mathbf{r}_c$)位置的位移(x)之间的复传递函数:

$$\underline{H}_x(j\omega, \mathbf{r}_c) = \frac{\underline{X}(j\omega, \mathbf{r}_c)}{\underline{U}(j\omega)} \quad (1)$$

测量点的精确位置被记录，它们能描述振膜表面的几何信息。根据应用的不同，测量网格上扫描点的数量可在50到3200之间（请看演示视频）。

图 2是一个扬声器传递函数响应的例子。红色箭头描述了低音扬声器在 $f_s \approx 50$ Hz 处的共振频率。在共振频率以下，假设刚性为常数，因为全部激发力量都进入了机械悬挂系统，所以音圈位移是常数。在共振频率以上，将会产生大约12 dB/octave 的衰减；在1 kHz 以上，由于振膜上产生模态分裂进而产生明显的差异，此部分将在后续进行详细的说明。

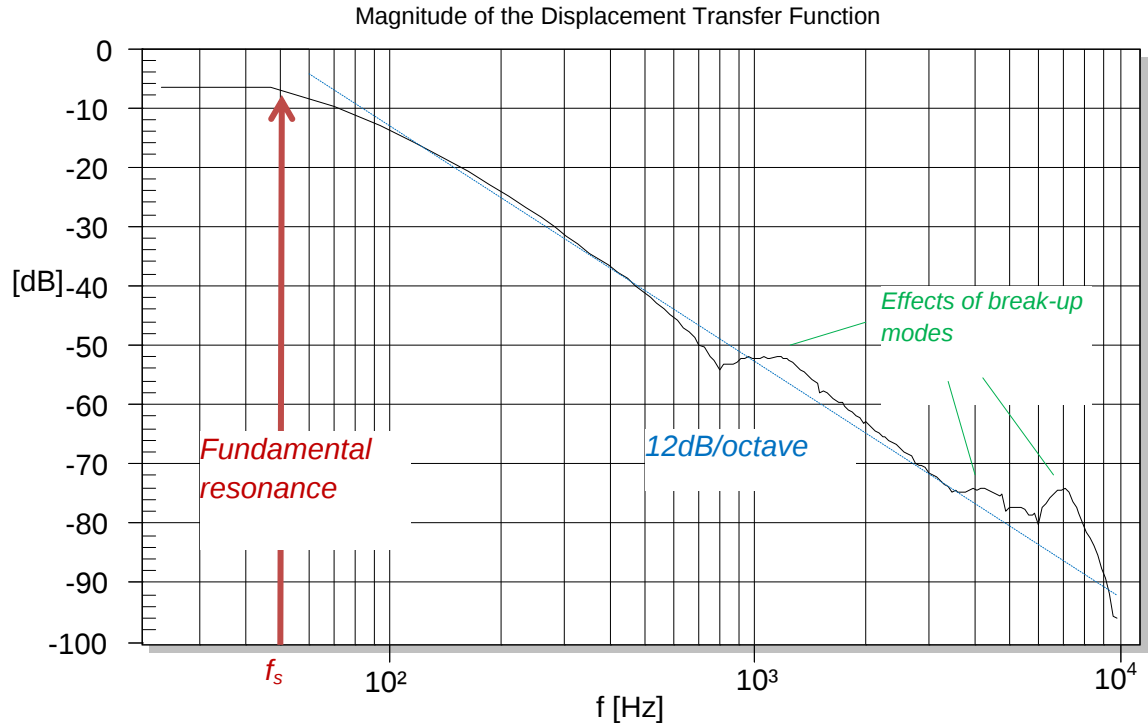


图2: 输入电压和点 $\mathbf{r}_c$ 处位移之间的传递函数大小 $\underline{H}_x(j\omega, \mathbf{r}_c)$

4.2 累计加速度级

辐射源的振动大小可以总结为一个参数: 累计加速度 (Accumulated Acceleration Level), 主要定义如下:

$$AAL(\mathbf{r}_a) = 20 \log \left(\frac{p_{aa}(\mathbf{r}_a)}{\sqrt{2} p_0} \right) \text{ dB} \quad (2)$$

利用声压势能

$$p_{aa}(\mathbf{r}_a) = \frac{\rho_0 \omega}{2\pi} \int_{S_c} \frac{|\underline{v}(\mathbf{r}_c)|}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|} dS_c \quad (3)$$

以及

- ρ_0 空气密度
- S_c 振膜表面
- $\mathbf{r}_c$ 表面元素 dS_c 中的一点
- $\mathbf{r}_a$ 远场观测点
- p_0 参考声压

以及利用终端电压(u)以及激光扫描获得的传递函数($\underline{H}_x(j\omega, \mathbf{r}_c)$)来表示的速度:

$$\underline{v}(j\omega, \mathbf{r}_c) = j\omega \underline{H}_x(j\omega, \mathbf{r}_c) \underline{u}(j\omega) \quad (4)$$

在忽略由于位移($|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|$)所造成的相位以及只考量速度(v)的大小的前提下, 声压位能(p_{aa})代表了在远场一点($\mathbf{r}_a$)的最大声压。因此, AAL 总会大于图 3中的声压级(Sound Pressure Level ; SPL)。

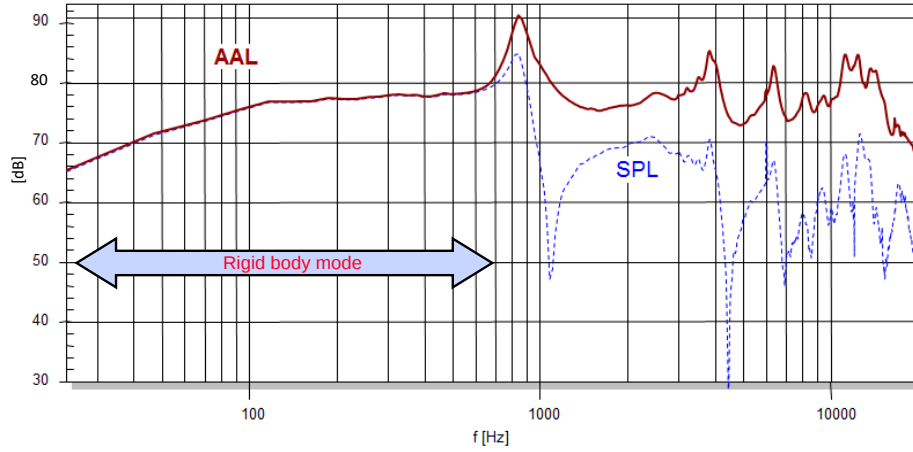


图3: 在相同的观察点($\mathbf{r}_a$)比较 AAL 与 SPL

在尚未发生模态分裂(800 Hz; 图 3)的低频段, SPL 与 AAL 相同; 而在高频段, AAL 在振膜模态共振处产生峰值; 相反地, SPL 的变化显示了在高频段明显的谷值(dips), 这些谷值主要是在声压辐射产生破坏性干涉的位置。

4.2.1 模态分析

AAL 响应的峰值与类似于集中参数模拟的基频共振频率点(f_s)的分布模态共振相同。自然频率相互间有正交化(orthogonal)的关系, 因此可作为构造函数来级数展开:

$$\underline{a}(\mathbf{r}_c) = \sum_{i=0}^{\infty} \underline{H}_i(j\omega) \psi_i(\mathbf{r}_c) \quad (5)$$

其中 $\psi_i(\mathbf{r}_c)$ 描述了振动模态以及 $\underline{H}_i(j\omega)$ 的局部分布状况; 而每一个振动模态的频率响应为:

$$\underline{H}_i(j\omega) = \frac{\omega^2}{1 + \eta_i j\omega / \omega_i - (\omega / \omega_i)^2} \quad (6)$$

通过读取图3中的3dB 带宽($f_2 - f_1$)就可以确定自然频率(ω_i)处的模态损失因子:

$$\eta_i = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_i} = \frac{f_2 - f_1}{f_i} \quad (7)$$

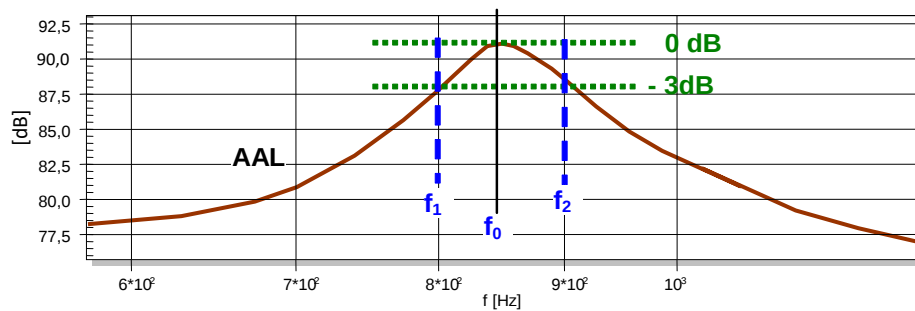


图4: 在 AAL 曲线上获得3dB 频宽大小

4.2.2 轴对称分解

倘若扬声器振膜为圆形，则所有的振动将可拆解成径向(radial)与周向(circumferential)两部分。径向上的模态传播可通过将振动(v)对角度(φ)平均得出径向速度来计算，如图 5。而周向的模态则是总振动量与径向振动量的差值：

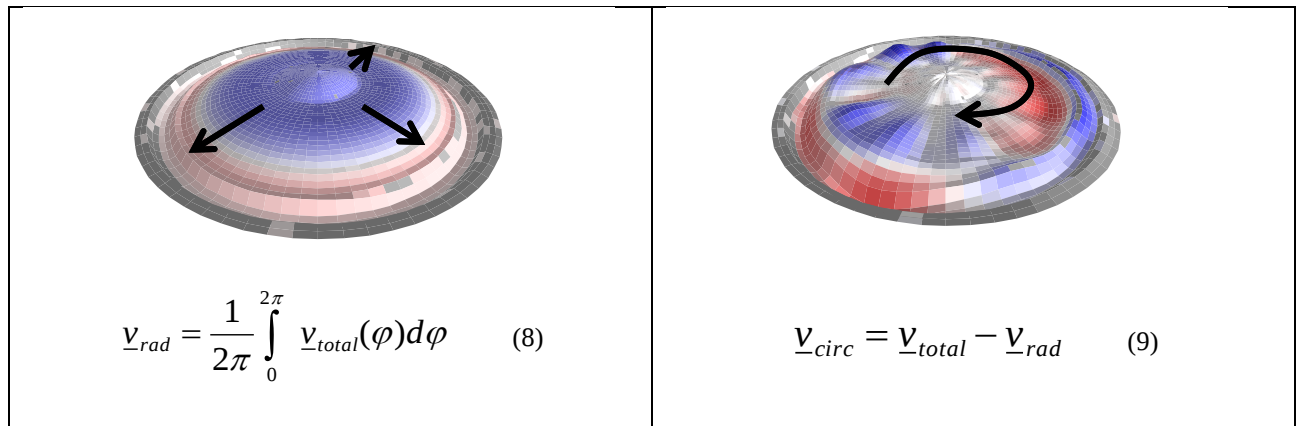


图5：在圆形振膜换能器上分离径向与周向模态

图 6显示周向模态的 AAL 将会随着频率的增加而提高。具有高振幅的周向模态将会产生显著的非线性失真，同时会降低轴向的声压级 SPL。然而，周向模态会产生显著的旁瓣，导致低方向性指数(Directivity Index; DI)。最低的周向分量在摇摆模态处，导致音圈在槽中摩擦。

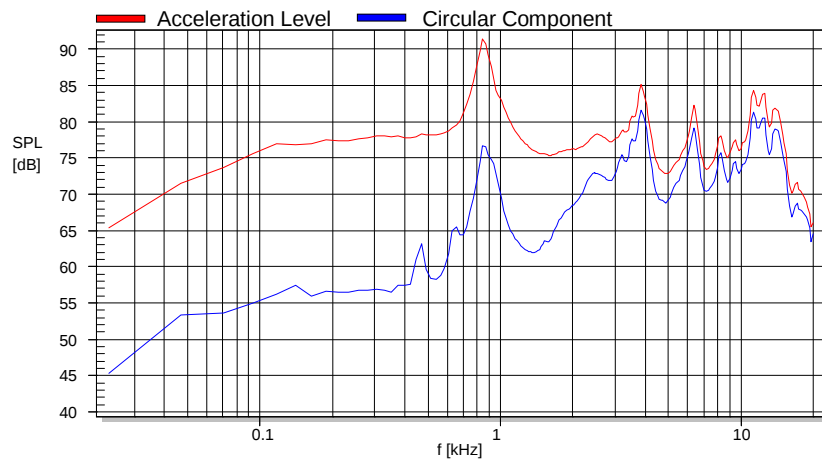


图6：总振动(紅色)与周向模态(蓝色)的 AAL 与频率间的关系

4.3 声波辐射

通过单极声源的振动速度(v)与相对应的面积(dS_c)所组成的体积流， $dQ=v(\mathbf{r}_c)dS_c$ ，即可得到振动面上(S_c)每个点($\mathbf{r}_c$)的声辐射，进而计算得出振动面(S_c)在观测点($\mathbf{r}_a$)所产生的声压($p(\mathbf{r}_a)$)。

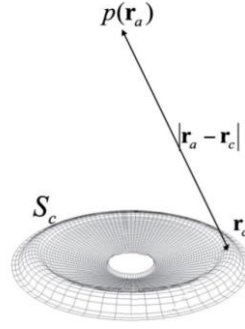


图7: 声辐射可利用振膜表面上的等效单极声源模拟

假设辐射源的表面固定在障板上, 则在远场一点($\mathbf{r}_a$)的总声压可利用第一瑞利积分对所有单极声源的分布进行积分计算得到:

$$\underline{p}(\mathbf{r}_a) = \frac{j\omega\rho_0}{2\pi} \int_{S_c} \frac{\underline{v}(\mathbf{r}_c)}{|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|} e^{-jk|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|} dS_c \quad (10)$$

其中 ρ_0 为空气密度。指数项($e^{-jk|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|}$)产生相位的偏移, 这个相位偏移的原因是由于声波由源点到观测点传播所需的时间造成的。分母项($|\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_c|$)主要描述声波随着声源与观测点距离的增加产生衰减的现象。声压级 SPL 利用以下公式加以定义 (其中 p_0 为参考声压):

$$SPL(\omega, \mathbf{r}_a) = 20 \log \left(\frac{|p(j\omega, \mathbf{r}_a)|}{\sqrt{2}p_0} \right) \text{ dB} \quad (11)$$

4.3.1 波束方向图(Beam Pattern)

图8是一个波束方向图, 它是在远场球面方位角(azimuthal angle ϕ)与仰角(elevation angle θ)处相对声压的变化量。

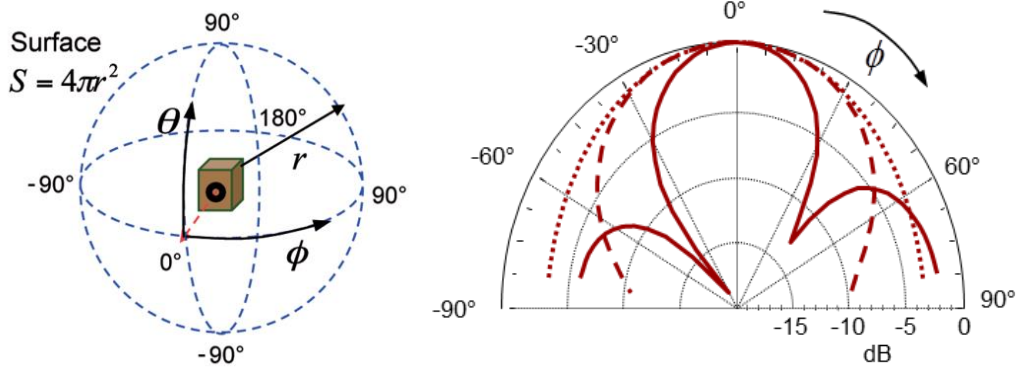


图8: 波束方向图

波束方向图的定义如下:

$$b(\theta, \phi) = 20 \log H(\theta, \phi) \text{ dB} = 20 \log \left(\frac{p(r, \theta, \phi)}{p(r, 0, 0)} \right) \text{ dB} \quad (12)$$

其中方向因子($H(\theta, \phi)$)的大小表示了一个在观测点位置为 $\{\phi, \theta, r\}$ 的声压($p(r, \theta, \phi)$)与在距离(r)处的轴向声压($p(r, 0, 0)$)的比例关系。因此, 轴向声压级($SPL_{ax}(r)$)可描述如下:

$$SPL_{ax}(r) = 20 \log \left(\frac{p(r, 0, 0)}{p_0} \right) \text{ dB} \quad (13)$$

4.3.2 声功率

远场中，声源辐射的总声功率(Π)可以利用在位置 $\{\phi, \theta\}$ 处表面(S)的声压均方结果进行积分后获得，方程式如下：

$$\Pi = \frac{1}{\rho_0 c} \int_S p(r, \theta, \phi)^2 dS \quad (14)$$

其中 c 为声速。声功率级(L_Π)定义如下：

$$L_\Pi = 10 \log_{10} \left(\frac{\Pi}{P_0} \right) \text{ dB} \quad (15)$$

$P_0=10^{-12}$ W 为参考功率。

4.3.3 方向性

方向性定义如下：

$$D = \frac{S}{\int H^2(\theta, \phi) dS} \quad (16)$$

并推导出描述声源波束的方向性指数 DI (Directivity Index)，单位是分贝 dB

$$DI = 10 \log_{10}(D) \text{ dB} \quad (17)$$

对于一个具有全向性辐射特性的单极声源来说，DI 为0 dB。

放置一个辐射声源(如振膜)在无穷大障板上并辐射声音到半空间中，可以找到一个与声源距离为 $r \approx 0.4$ m 的观测点，此处的 DI 为声压与声功率的差值：

$$DI \approx SPL_{ax}(r = 0.4m) - L_\Pi \quad (18)$$

图9显示了声源在障板上最重要的三个响应。在低频段声波的波长远大于几何尺寸，辐射源振动类似刚体运动使得扬声器产生一个全向性的辐射图，因此这三条曲线大小皆相同。高频段，由于模态分裂产生，声波的相消造成了 AAL 与 SPL 的差异。而高频处轴向 SPL 与声功率的差异与上升的 DI 以及声源波束相同。

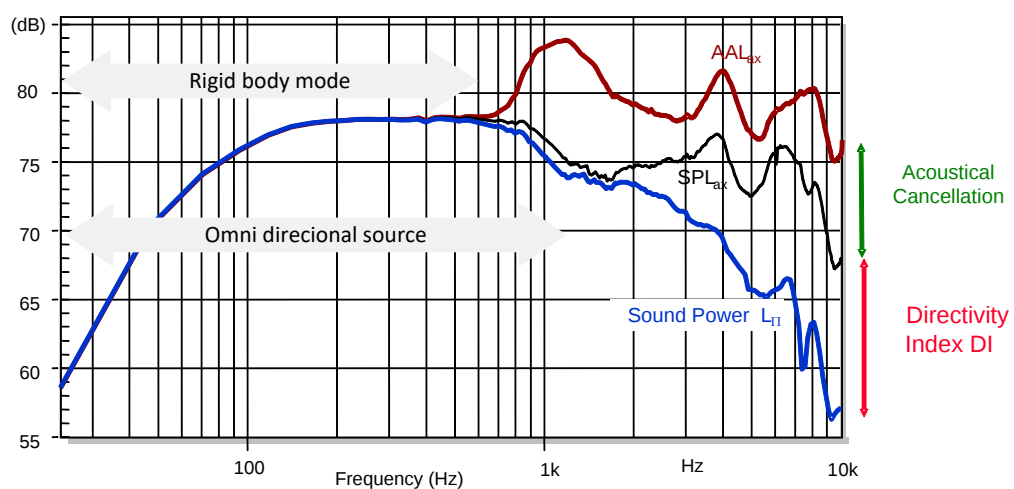


图9：一辐射声源在障板上距 $r = 0.4$ m 处的 AAL、声功率与轴向 SPL 响应

4.3.4 声压相关的分解(Sound-Pressure-Related Decomposition)

为了解释声波抵消（消声），将总振动分解成三个振动分量的方式是相当有用的：

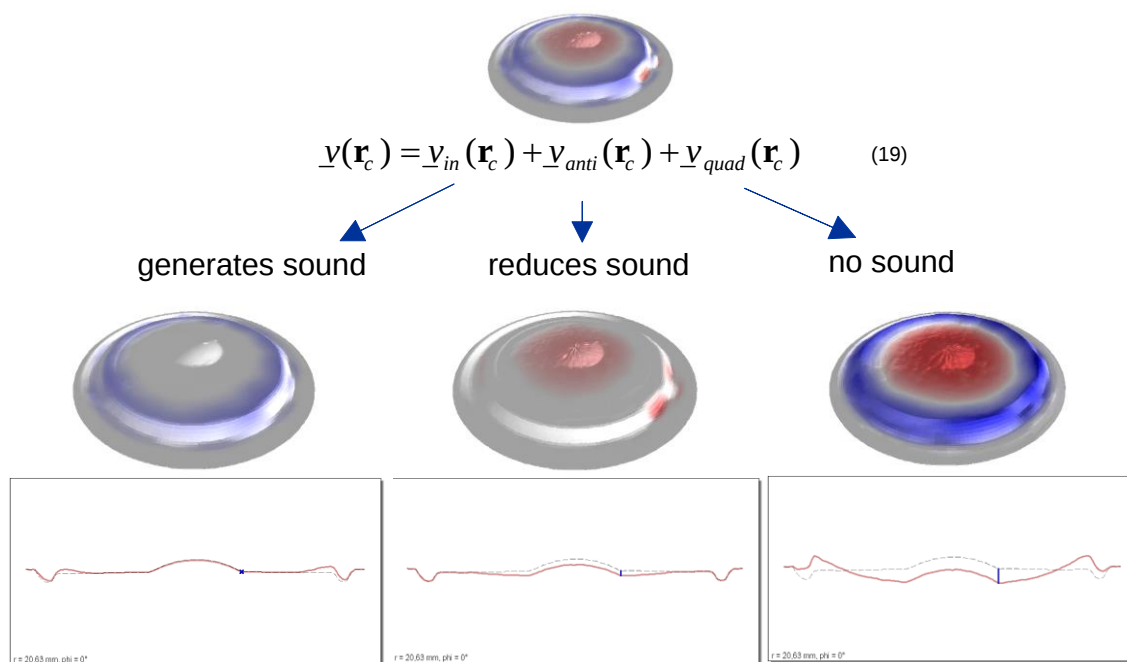


图10: 声压相关的分解

同相(in-phase)分量($v_{in}(r_c)$)对观测点(r_a)的声压($p(r_a)$)是有正向的贡献。反相(anti-phase)分量($v_{anti}(r_c)$)是一种负向的贡献，并会造成声压($p(r_a)$)的降低。正交(quadrature)分量($v_{quad}(r_c)$)可以利用辐射源面上其它点的贡献完全补偿，并且不会影响到观测点(r_a)的声压($p(r_a)$)。KLIPPEL 工程海报上的“Loudspeaker Sound Radiation”对于分解的方法有详细的描述说明。

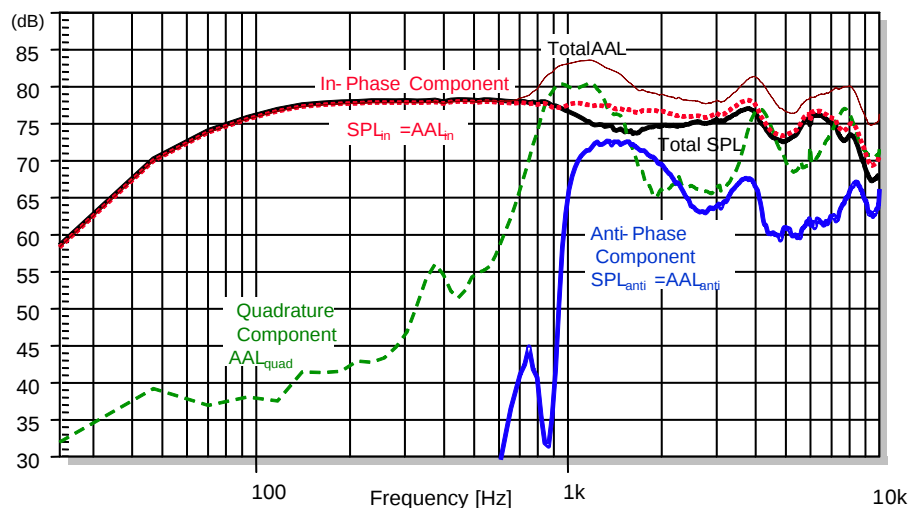


图11: AAL 与 SPL 的声压分量比较

三个振动的分量可利用图11对于 AAL 与 SPL 响应的比较进行更详细的说明：

1. 同相的 $SPL_{in}=AAL_{in}$ 可大于总 SPL 但不会超过总 AAL。在振膜分裂前，也就是不考虑反相分量与正交分量的条件下，这两曲线重合。
2. 反相的 $SPL_{anti}=AAL_{anti}$ 在模态分裂频率处(此处为 1 kHz)会快速的上升，但不会超过同相 $SPL_{in}=AAL_{in}$ 的值。
3. 正交分量不会产生声压，但是 AAL_{quad} 可以超过同相的分量。在 380 Hz 的峰值描述的是摇摆模态。

4.3.5 声波抵消（消声）

倘若在不能忽略反相分量并且同相分量 SPL_{in} 与反相分量 SPL_{anti} 的差异如图12所示小于10 dB 时，声波的抵消将会造成 SPL 响应曲线上明显的谷点(dips)。

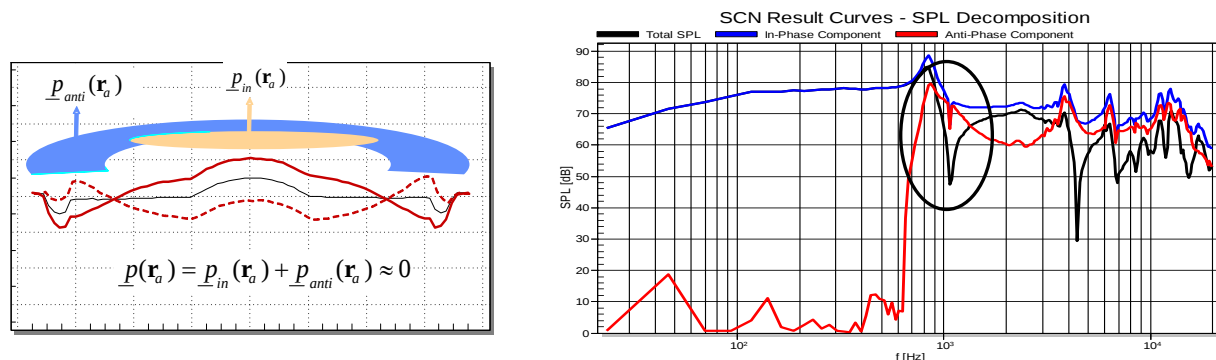


图12: 总 SPL 响应曲线上由于声波相消所产生的谷值

4.4 摇摆模态(Rocking Mode)

在低频段，折环上的第一个周向模态会导致振膜的摇摆以及低频率时音圈架的倾斜。这可能是由于音圈在槽间的摩擦造成冲击失真所引起的现象。

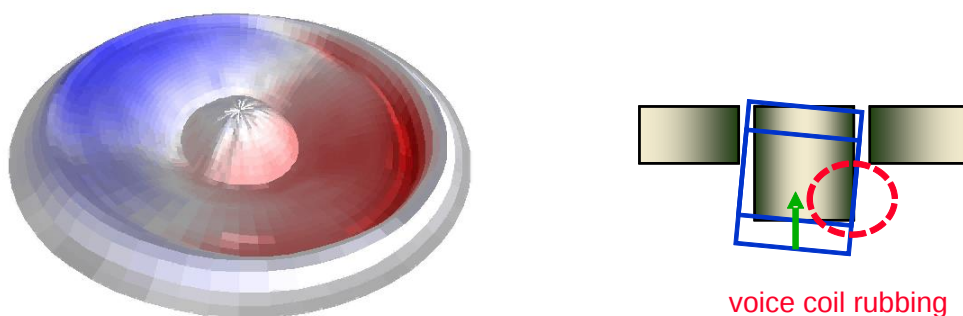
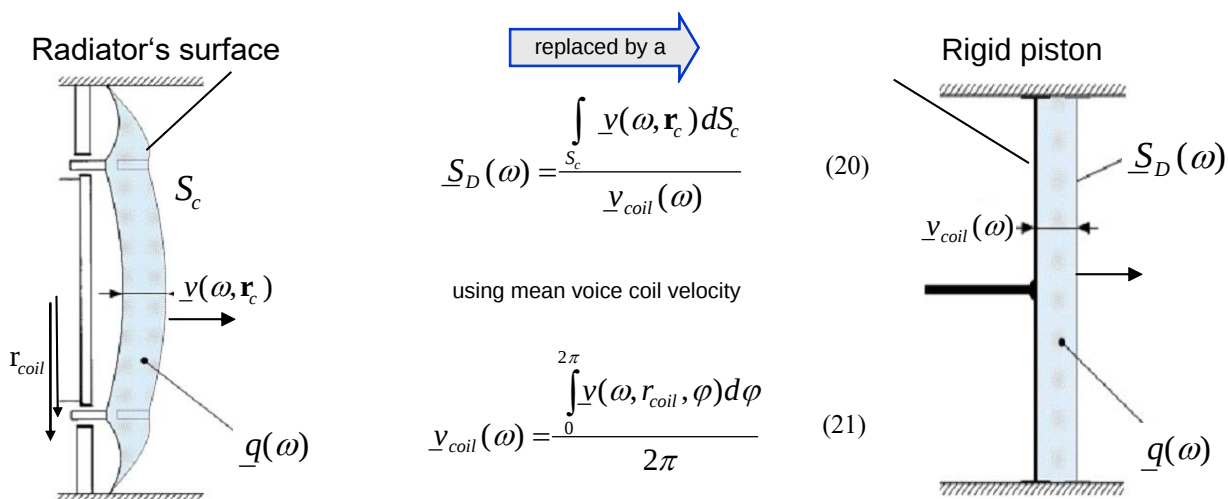


图13: 摇摆模态(左)以及音圈摩擦(右)

摇摆模态会导致声辐射的情况变差，这是由于辐射表面表现为两个声源(声偶极)，而这两个声源产生一正一反且大小几乎相同的体积流，导致轴向声压很低。正交分量(AAL_{quad})对于任何形状的辐射源(如矩形振膜)的摇摆模态来说都是一个非常好的指标。

4.5 有效的辐射面积

有效辐射面积(S_D)对于描述声波辐射来说是一个重要的集中参数，这里辐射面被当做刚体活塞，其振动速度是音圈速度 v_{coil} 的平均值，其产生的体积速度 q (活塞表面积 S_D) 与辐射面积 S_c 产生的体积速度相等。音圈速度 v_{coil} 的平均值可通过振动速度在一个音圈半径为 r_{coil} 的圆周上进行积分获得，这个半径上可以抑制摇摆以及其它非对称的振动模态。

图14: 计算有效面积 $S_D(\omega)$ 与频率间的关系

根据上述的定义, 有效辐射面积($S_D(\omega)$)是一个频率(ω)的函数。这个函数可用来预测在辐射轴上任一距离处的声压。在大部分的情况下, 可从谐振频率(ω_0)处的值推导出幅射面积($S_D = |S_D(\omega_0)|$)。

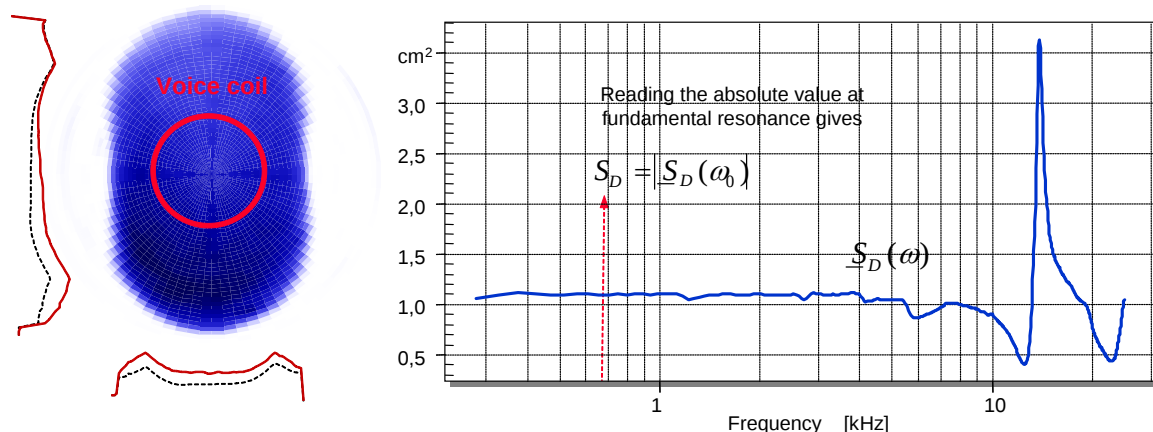


图15: 音圈位置(左)与有效辐射面积图(右)

对于低音扬声器而言, 由于折环的宽度小于振膜的內径, 有效辐射面积可由折环的内外径的平均值近似获得。这个近似并不适用于微型扬声器或是头戴式耳机及双耳式耳机的换能器, 主要原因在于这些换能器的折环面积相对振膜来说较大, 并且弯曲的几何外形相对于折环的偏移会有非线性衰减。

5 准备问题

在正式开始训练前, 先确保你已经理解理论部分。请选择正确的答案, 有时候答案不止一个。

QUESTION 1: 在低频段的振膜与防尘盖如何运动?

- ☐ **MC a:** 振膜与防尘盖的运动如同刚体运动, 所有的点将产生相同的大小与相位。
- ☐ **MC b:** 振膜与防尘盖的运动如同弹性体, 所有的点将产生不同的大小与相位。
- ☐ **MC c:** 振膜与防尘盖在某些频率点振动可能有不同的大小与相位, 这是由于摇摆模态使折环和定心支片发生形变, 但是倾斜后的振膜与防尘盖是以刚体运动。

QUESTION 2: 在振膜与接收点的距离增加一倍时, 远场接收点(ra)的 SPL 会有什么变化? (利用方程式(11)来回答)

- ☐ MC a: 声压增加2dB。
- ☐ MC b: 声压增加6dB。
- ☐ MC c: 声压降低2dB。
- ☐ MC d: 声压降低6dB。

QUESTION 3: 比较方程式(11)对于观测点声压级(SPL)的计算和方程式(2)里 AAL 的计算。AAL 和 SPL 之间是什么关系?

- ☐ MC a: AAL 与 SPL 在低频处具有相同的大小, 这是由于辐射源(振膜)的振动形式如同刚体一般, 并且在此条件下声波的波长远大于辐射源的几何形状。
- ☐ MC b: 在相同的观察点处($\mathbf{r}_a$), SPL 从不会大于 AAL。
- ☐ MC c: SPL 的计算考虑的机械振动的相位角以及由于声源($\mathbf{r}_c$)与观测点($\mathbf{r}_a$)处传播所造成的相位偏移。
- ☐ MC d: 假如在振膜上所有的点对于观测点($\mathbf{r}_a$)的总声压(SPL)具有正向的贡献, 则 AAL 的计算可忽略相位的部分并且与最大声压具有相同的大小。

QUESTION 4: 同相、反相以及正交分量之间的关系是什么?

- ☐ MC a: 同相的 AAL_{in} 绝对不会小于反相的 AAL_{anti} 。
- ☐ MC b: 反相的 AAL_{anti} 总是大于反相的 SPL_{anti} 。
- ☐ MC c: 正交分量的 SPL_{quad} 总是大于同相的 SPL_{in} 。
- ☐ MC d: 正交分量的 AAL_{quad} 与正交分量的 SPL_{quad} 相同。
- ☐ MC e: 同相的 AAL_{in} 与同相的 SPL_{in} 相同。

6 解读扫描数据(无需硬件)

Step 1: 观看演示视频 *Vibration and Radiation Behavior of Loudspeaker Membrane* 以了解如何完成一个实践分析。

Step 2: 从网页 www.klippel.de/training 下载 Klippel Scanning System SCN 以及 dB-Lab, 并安装在自己的电脑中。

建议: 离线完成以下的练习并且将多选的答案记录在纸上!

6.1 辐射面积的位移

Step 3: 执行 **honeycomb.ksp** 进而开启 *SCN Analysis Software* 来观看蜂巢材料的平面辐射源的激光扫描测量结果。

Step 4: 选择“**Cross Section View**”, 按“**Animation**”以及调整“**Amplitude Enhancement**”进而产生辐射源的“固有”振动。

Step 5: 在图形上按鼠标右键并开启“**Show Current Point**”。设定游标到辐射源的中心观看端子电压($U(f)$)以及特定观测点($\mathbf{r}_c$)位移($X(f, \mathbf{r}_c)$)所组成的传递函数($H_x(f)$)大小。

QUESTION 5: 在两倍频率的条件下($70 \text{ Hz} < f < 5 \text{ kHz}$), 传递函数($H_x(f)$)的大小该是如何变化?

- ☐ MC a: 传递函数($H_x(f)$)的大小以近似每音程6 dB 的大小下降。
- ☐ MC b: 传递函数($H_x(f)$)的大小以近似每音程12 dB 的大小下降。
- ☐ MC c: 传递函数($H_x(f)$)的大小以近似每音程18 dB 的大小下降。

Step 6: **honeycomb.ksp** 中, 在图形下沿处的“**Displacement Transfer Function**”设定到140 Hz, 在上半部剖面图不同位置点设定蓝色标签, 观看传递函数($H_x(f=140 \text{ Hz}, r)$)与半径(r)的关系。

QUESTION 6: 在低频段($f=140\text{ Hz}$), 传递函数($H_r(f)$)与半径(r)间的关系怎样?

- ☐ **MC a:** 由于在此振膜区域上具有较高的弯曲刚度(bending stiffness)以及在低频时以刚体运动, 使得传递函数幅值基本不变。
- ☐ **MC b:** 所有的形变都在折环处, 幅度从折环内圈到外圈按线性下降。因此折环中间的位移量总是比音圈位移低约6dB。这是利用悬挂系统内外径平均值的计算方式获得精确的等效辐射面积(S_D)的基础。
- ☐ **MC c:** 幅值从折环内部到外部边界呈现非线性的下降。在蜂巢式扬声器折环中点的位移比振膜位移低约3 dB。这在等效辐射面积(S_D)测量上有许多主要的结果(声学测量的结果与几何测量结果不同)。

6.2 模态分析

Step 7: 选择在 **honeycomb.ksp** 档案中 **Cross-sectional View**, 并且在下边图形上按鼠标右键关掉 **“Show current point”**。在 **Modeling Mode** 上选择 **“Acceleration”** 选项。移动下边图形中的加速度级曲线(红色)的频率游标到峰值点, 此处的频率为其自然频率。

QUESTION 7: 对于自然频率843 Hz 与6.14 kHz 处的模态振动来说, 扬声器的哪一个部份的变形最明显?

- ☐ **MC a:** 843 Hz: 折环与蜂巢式振膜; 6,14 kHz: 蜂巢式振膜
- ☐ **MC b:** 843 Hz: 折环; 6,14 kHz: 蜂巢式振膜
- ☐ **MC c:** 843 Hz: 折环与蜂巢式振膜; 6.14kHz: 折环与蜂巢式振膜。
- ☐ **MC d:** 843 Hz: 折环; 6,14kHz :折环。
- ☐ **MC e:** 843 Hz: 蜂巢式振膜; 6,14 kHz: 蜂巢式振膜。

QUESTION 8: 哪一个频率点提供最大的 AAL?

- ☐ **MC a:** 6.1 kHz.
- ☐ **MC b:** 5 kHz.
- ☐ **MC c:** 2.5 kHz.

Step 8: 用光标读取 **honeycomb.ksp** 里6.14 kHz 处的 AAL 响应的3 dB 频宽。

QUESTION 9: 利用方程式(7)确定在6.14 kHz 处的模态损失因子。

- ☐ **MC a:** $\eta \approx 0.03$
- ☐ **MC b:** $\eta \approx 0.3$
- ☐ **MC c:** $\eta \approx 0.003$

QUESTION 10: 为何模态损失因子在6.14 kHz 时会小于5 kHz?

- ☐ **MC a:** 因为在6.14 kHz 时折环的振动量非常小, 并且蜂巢材料提供的阻尼小于折环。
- ☐ **MC b:** 因为在6.14 kHz 时折环的振动量非常小, 并且蜂巢材料提供的阻尼大于折环。

QUESTION 11: 如何增加在6.14 kHz 处的模态损失因子 η ?

- ☐ **MC a:** 采用不同的折环材料以提高阻尼。
- ☐ **MC b:** 采用不同的定心支片材料以提高阻尼。
- ☐ **MC c:** 采用不同的蜂巢材料以提高阻尼。

QUESTION 12: 低模态损失因子对于声压输出方面的影响是什么?

- **MC a:** SPL 曲线上有明显的峰值，这符合在累积衰减频谱中长时间响铃(long ringing)的现象(瞬态失真)。
- **MC b:** 高扰动量会导致声压输出非线性失真。
- **MC c:** 低模态损失因子只会影响机械振动，不会影响声波的辐射以及声压的输出。

6.3 轴对称分解

Step 9: 打开 **piston driver.ksp**，选择 **Animation**。在 **Modelling Mode** 选“**Acceleration**”；在 **Decomposition** 下选“**Radial**”并且选择“**Total Vibration**”。执行“**Animation**”选项。

Step 10: 在下边图形中设定频率光标到 140 Hz；在 **Decomposition** 中选择不同分量“**Radial**”和“**Circular**”，并与“**Total Vibration**”进行比较，调整“**Amplitude Enhancement**”进而观看每个分量。

QUESTION 13: 在 140 Hz 处的振动行为是由哪一种模态所决定？

- **MC a:** 轴对称模态决定所有分量。
- **MC b:** 由于周向分量低于总振动的 AAL20 dB 以上，因此可被忽略。
- **MC c:** 周向模态影响定心支片与折环，导致活塞（摇摆模态）产生微量倾斜，由于很小可以忽略。
- **MC d:** 在这个频率点，周向与径向模态具有相同的 AAL。
- **MC e:** 此频率点没有周向模态。

Step 11: 在下部的图表中设定频率光标到总 AAL 的第二个峰值点(3.9 kHz 处)；在 **Decomposition** 中选择不同分量“**Radial**”以及“**Circular**”，并与“**Total Vibration**”进行比较，调整“**Amplitude Enhancement**”进而观看每个分量。

QUESTION 14: 在 3.9 kHz 处的振动行为是由哪一种模态所决定？

- **MC a:** 轴对称模态决定总振动(忽略周向模态)。
- **MC b:** 周向模态决定总 AAL(忽略径向模态)。
- **MC c:** 周向模态影响定心支片与折环，导致活塞模态产生微量倾斜(摇摆模态)。
- **MC d:** 在这个频率点，周向与径向模态具有相同的 AAL。

6.4 声压

Step 12: 在 **Modelling Mode** 选择“**Acceleration**”，在 **Decomposition** 选择“**SPL related**”与“**Total Vibration**”；设定角度 $\theta=0^\circ$ 与 $\varphi=0^\circ$ 进而观看轴向响应，比较总 AAL 与总 SPL。

QUESTION 15: SPL 与 AAL 响应之间的关系是什么？

- **MC a:** 小于 800 Hz 时，由于辐射源的振动类似刚体运动，所以 SPL 与 AAL 响应几乎相同。
- **MC b:** AAL 的峰值对应于相同频率处 SPL 的高值。
- **MC c:** SPL 的谷值对应于相同频率处 AAL 的峰值。

6.5 波束方向图

Step 13: 在 **piston driver.ksp** 中观看 **Radiation Analysis**，在 **Modeling Mode** 选择“**SPL**”并且在 **Decomposition** 中选择“**SPL related**”以及“**Total Vibration**”；改变化角度 φ (旋转右上方图中的光标)，进而比较左上方的极化图(polar pattern；在不同角度 θ 的 SPL 不同)。

QUESTION 16: 在 700 Hz, 1.1 kHz 以及 1.5 kHz 频率点处，SPL 如何随着角度 φ 与 θ 变化？

- **MC a:** 在700 Hz 与1.5 kHz 的 SPL 随着角度 θ 的变化非常小(< 3 dB), 形成近似全向特性的方向图。
- **MC b:** 在1.1 kHz 处, 轴上($\theta = 0^\circ$)的 SPL 小于非轴上(比如 $\theta > 50^\circ$)。
- **MC c:** 对于上述三个频率点来说, SPL 的指向性图与角度 φ 无关(旋转右上方图形的游标)。
- **MC d:** 对于上述三个频率点来说, 全都是全向性图(在任何 φ 与 θ 皆具有相同的 SPL)。

QUESTION 17: 在高自然频率点11.2 kHz, 12.5 kHz 处, 波束图如何变化?

- **MC a:** 高频处, 扬声器呈现全向性。
- **MC b:** 高频处, 扬声器在轴上($\theta = 0^\circ$)比非轴上($\theta > 50^\circ$)产生更多的 SPL。

Step 14: 在 *Decomposition* 模态选择“**Radial**”然后“**Circular**”来观察在 *Radiation Analysis* 呈现的周向模态波束图。改变角度 φ (旋转右上方图形的游标) 并且在下面图中改变频率光标。

QUESTION 18: 周向模态的典型辐射特性是什么样的?

- **MC a:** 对任一角度 φ 与频率来说, 波束在轴上的大小为零($\theta=0^\circ$), 这是因为周向模态会在周向上产生定期振动, 而这个振动是由数目相同并且强度上也相同的正向与反相声源所组成, 他们在远场上的声压互相抵消。
- **MC b:** 在低频处, 非轴向上的抵消情况消失, 因此 SPL 随着 $|\theta|$ 增加而提升。
- **MC c:** 周向模态产生全向性辐射图。

6.6 方向性指数

Step 15: 在文件 **piston_driver.ksp** 中执行“**Tools**”, 选择“**Sound Power**”并执行“**Start Calculation**”, 寻找方向性指数为负的频率点。

QUESTION 19: 方向性指数为-10dB(DI = -10 dB)的意义是什么?

- **MC a:** 在相同的声功率条件下, 轴上的 SPL 比全向声源产生的 SPL 小10dB。
- **MC b:** 在相同的声功率条件下, 轴上的 SPL 比全向声源产生的 SPL 大10dB。
- **MC c:** 无限障板上的辐射源在轴上距离0.4 m 处产生的 SPL 小于声功率级10dB。
- **MC d:** 无限障板上的辐射源在轴上距离0.4 m 处产生的 SPL 大于声功率级10dB。
- **MC e:** 扬声器在轴上是一个束的形式。

6.7 声压分解

Step 16: 在文件 **piston_driver.ksp** 分析中选择 *Decomposition* 下的“**SPL related**”; 设定角度($\theta=0^\circ$)来分析轴向的声压, 选择“**In-phase Component**”并观察在843 Hz 处的振动形态。

QUESTION 20: 843 Hz 产生声音的位置在何处?

- **MC a:** 活塞中心对于轴上的声压输出呈现建设性的贡献。
- **MC b:** 活塞外部面积与折环对于轴上的声压输出呈现建设性的贡献。
- **MC c:** 完整的折环与振膜面积对于轴上的声压输出产生贡献。

Step 17: 比较在843 Hz 测量所得“**Quadrature Component**”、“**Anti-phase Component**”以及“**In-phase Component**”的振动形态。固定角度($\theta=0^\circ$) 进而分析轴向的声压。

QUESTION 21: 在某一个特别的频率, 振膜上点(r_c)处可贡献什么模态?(看图 10)

- **MC a:** 此点可以贡献正交模态以及同相或反相分量两者其一。
- **MC b:** 此点可以同时贡献同相或反相分量。
- **MC c:** 此点可以贡献全部分量 (正交、同相、反相)。

Step 18: 按“**Export Curve**”储存曲线到.kdbx, 并在 **dB-Lab** 中打开。打开项目  “**Piston Driver**”中的实验  **CAL Scanner Results** 并且检查结果窗口“**Result Curve 1**”。比较 *In-Phase* 以及 *Anti-Phase* 响应。

QUESTION 22: 哪些频率点的 *In-Phase* 与 *Anti-Phase* 具有差不多的 SPL 值?

- ☐ **MC a:** 在换能器的第一共振频率。
- ☐ **MC b:** 在总声压曲线中呈现谷点处的频率(声压抵消点)。
- ☐ **MC c:** 在频率1.078 kHz 与4.429 kHz。
- ☐ **MC d:** 在高阶模态的自然频率点并且它们的 AAL 呈现局部最大(共振峰值)。
- ☐ **MC e:** 同向总是比反向来得大。

6.8 摇摆模态

Step 19: 回到 SCN 分析软件并选择 **Animation.**; 在 *Decomposition* 选择“**QuadratureComponent**”并且固定角度($\theta=0^\circ$)进而分析轴上的 AAL。在 *Modeling mod* 选到“**Acceleration**”; 观察在 AAL 中局部峰值的辐射图; 调整“**Amplitude Enhancement**”进而可看到振动情况。

QUESTION 23: 哪个频率点产生摇摆模态?

- ☐ **MC a:** 摇摆模态发生在140 Hz 且小于 AAL 总量约28 dB; 因此, 摇摆模态并不重要。
- ☐ **MC b:** 摇摆模态发生在468 Hz 且小于 AAL 总量约17 dB; 因此, 摇摆模态并不重要。
- ☐ **MC c:** 摇摆模态发生在890 Hz 且小于 AAL 总量约12 dB; 因此, 摇摆模态并不重要。
- ☐ **MC d:** 摇摆模态发生在2.5 kHz 且小于 AAL 总量约4 dB; 因此, 由于差异小于10 dB 以内, 摇摆模态显得很重要。

Step 20: 打开 **headphone.ksp** 并依照 step 19操作。

QUESTION 24: 头戴式耳机换能器的摇摆模态在哪里?

- ☐ **MC a:** 摇摆模态发生在1.8 kHz 且小于 AAL 总量约3 dB, 并且与同向分量(in-phase)几乎相同; 因此, 摇摆模态控制着所有的振动并且很重要。
- ☐ **MC b:** 摇摆模态发生在398 Hz 且小于 AAL 总量约 2 dB, 并高于同向分量约3 dB; 因此, 摇摆模态控制着所有的振动并且很重要。
- ☐ **MC c:** 摇摆模态发生在4.5 kHz 且小于 AAL 总量约13 dB; 因此, 摇摆模态并不重要。
- ☐ **MC d:** 摇摆模态发生在8.3 kHz 且小于 AAL 总量约6 dB; 因此, 由于差异小于10 dB 以内, 摇摆模态显得很重要。

6.9 有效辐射面积

Step 21: 在文件 **headphone.ksp** 中选择“**Tools**”下的“**SD Calculation**”。在左上方图形中设定蓝色光标到 $r_{\text{coil}} = 7.5 \text{ mm}$, 表示音圈的位置。观察有效辐射面积 $S_d(f)$ (是频率的函数)。

QUESTION 25: 为何在高频处($>10 \text{ kHz}$)的辐射面积 $S_d(f)$ 会增加?

- ☐ **MC a:** 因为音圈移动量大, 但是振膜的其它面积在高频处的振动量却很小。
- ☐ **MC b:** 因为音圈在高频的移动量小, 而其它部分所产生的体积速度大(振膜中心)。
- ☐ **MC c:** 在高频处正交分量持续提高进而降低高频的声压输出。

Step 22: 在左上方图形中设定蓝色的游标到折环的中心 ($r=12 \text{ mm}$)以及振膜中心 ($r=3 \text{ mm}$)并且调查半径对于有效辐射面积(S_d)的影响。

QUESTION 26: 指定的半径(r)如何影响 S_d 值?

- **MC a:** 假设指定的半径(r)大于音圈半径(r_{coil})，音圈的平均速度可在振膜中心区域计算获得，这里速度随半径增加而降低；因此，音圈速度(v_{coil})将小于实际的大小，并且有效辐射面积(S_D)将大于实际的值。
- **MC b:** 假设指定的半径(r)小于音圈半径(r_{coil})，音圈的平均速度可在振膜的中心计算得到；因此，音圈速度(v_{coil})可正确测量得到，而在计算有效辐射面积(S_D)上产生的误差也可以被忽略。
- **MC c:** 半径(r)对于 S_D 的影响很小。

7 完成振动扫描(需要硬件)

倘若有扫描的硬件，建议针对指导者或者参加者提供的换能器完成一次的扫描实验。这个可选实验的目的在于分析扫描网格的影响以及能确定扫描时间的点数。

7.1 扫描硬件的介绍

演示视频 [Vibration and Radiation Behavior of Loudspeakers Membrane](#) 将给出实际操作扫描仪软件和硬件的指南。详细的描述可参考手册。

7.2 快速扫描

Step 23: 开启 Klippel Scanning System SCN 软件。

Step 24: 在 *File* 选单中选择 **Perform New Scan**。最短的扫描是 *profile scan*，这是只针对单一角度采用非对称网格的方式。

Step 25: 在初始化后，开始一个新的扫描任务。创建一个项目文件 (*Project File*) 并给定名字 “**profile scan.ksp**”。

Step 26: 离开 *Scan Setup* 采用预设的设定并进到 **Measurement Grid Setup**。

Step 27: 在 *Grid* 中，选择 *Preset* 下的 **Profile Grid** 进行单一线段的测量并且输入待测物的外半径 (**Outer Radius**)，点击 “**Save and Start**”。

Step 28: 接着进行 **Scan Preparation** 设定并开始扫描。

Step 29: 完成扫描后（只需几分钟），开启 *SCN Visualization Software*。

Step 30: 选择 *SPL* 内的反向分量，寻找模态分裂时的频率($f_{break-up}$)，在这个频率点反相分量的 *SPL* 将会快速的提升并且低于总 *SPL* 约30dB。

$$SPL(f_{break-up}) - SPL_{anti}(f_{break-up}) = 30dB$$

Step 31: 在 *AAL* 选择总分量(*total component*)，寻找 *AAL* 不同最大值处的自然频率。确定模态损失因子；材料是否给此模态提供最佳的阻尼？观察振动的模态，哪一个元件(折环、振膜、防尘盖)对于总模态损失因子具有明显的贡献？

7.3 正规扫描

Step 32: 重复步骤 Step 23: - Step 26:取一个名字“**explore scan.ksp**”。

Step 33: 在 *Preset* 中选择 **Manual Grid** 设定扫描网格。

Step 34: 选择 **CircularScan Area**，输入待测物的半径 (**Radius**) 以及采用规则间距 **Radius Steps** 与 **Angle Steps**。

Step 35: 接着进行 **Scan Preparation** 设定。

Step 36: 扫描后利用软件观看测量结果。

Step 37: 比较实验 **profile scan.ksp** 和 **explore scan.ksp** 的轴向声压 SPL 响应曲线，并解释其差异。

Step 38: 调查网格线对于扬声器周向模态的测量的影响。

选择 AAL 中的正交分量，找到 AAL 正交分量中第一个最大值的频率点(f_{rock})，即为摇摆模态。
 $AAL_{rock}(f_{rock}) = AAL_{quad} - AAL_{in}$ 的差值是否大于 -5 dB ?

Step 39: 在 TOOLS 下开始 *Sound Power Calculation*。观看方向性指数以及找到 DI=6 dB 的频率点 (f_{6dB})。

Step 40: 在 TOOLS 下开始 SD Calculation，设定游标到音圈的位置并且读取有效辐射面积值(S_D)。

8 更多的参考文献

KLIPPEL R&D SYSTEM操作手册 – SCN VibrometerSCN测振仪

测振仪规范 C5 Scanning Vibrometer (SCN):

http://www.klippel.de/fileadmin/klippel/Bilder/Our_Products/R-D_System/PDF/C5_SCN_Scanning_Vibrometer.pdf

海报Loudspeaker Cone Vibration扬声器振膜振动:

http://www.klippel.de/fileadmin/migrated/content_uploads/KLIPPEL_Cone_Vibration_Poster_01.pdf

海报Loudspeaker Sound Radiation扬声器声音传播:

http://www.klippel.de/fileadmin/migrated/content_uploads/KLIPPEL_Sound_Radiation_Poster_01.pdf

应用记录 AN31 Cone Vibration and Radiation Diagnostics振膜振动和辐射诊断:

http://www.klippel.de/fileadmin/migrated/content_uploads/AN_31_Cone_Vibration_and_Radiation_Diagnostics.pdf

论文*Distributed Mechanical Parameters Describing Vibration and Sound Radiation of Loudspeaker Drive Units*描述扬声器驱动单元振动和声音传播的分布式机械参数:

http://www.klippel.de/fileadmin/migrated/content_uploads/Klippel_Schlechter_Distributed_parameter.pdf

论文*Visualization and Analysis of Loudspeaker Vibrations*扬声器振动的可视化和分析:

http://www.klippel.de/fileadmin/migrated/content_uploads/Visualization_and_Analysis_of_Loudspeaker_Vibration_01.pdf