

# 有源扬声器设计中软件和硬件资源的最佳利用

Wolfgang Klippel

(KLIPPEL GmbH, Mendelssohnallee 30, 01277 Dresden, Germany)

**摘要：**现代音频设备希望以最少的代价（尺寸、重量、成本和能源）产生所需的声输出，而提高电声转换的效率和电压灵敏度是其中的关键。传统的扬声器设计会为了提升音质而牺牲效率。非线性自适应控制可以补偿不希望的信号失真、保护换能器免于过载、稳定音圈位置并应对悬挂系统的时变特性。本文提出了一种有源扬声器系统的新设计概念，可采用 DSP 提供的新的自由度来充分利用非线性电机拓扑结构、软悬挂系统以及振膜、面板和声学系统中的模态振动。

**关键词：**扬声器设计，数字信号处理，非线性自适应控制，效率

## 0 引言

数字信号处理技术的进步，为控制馈入给扬声器的输入信号提供了新的机会，这样可以产生更多的声输出、更理想的方向性和更少的失真，同时还保护换能器免受热过载和机械过载。具有自主学习功能的软件可以提供通用解决方案，以监视换能器的属性、生成最佳控制输出并适应不断变化的条件。此外，随着集成度的提高，数字信号处理系统将变得更实惠，可以与纸、铁、钹和其他扬声器材料相比。

本文提出了一种新的设计理念，用于探索在数字信号处理 DSP 技术所提供更多自由度条件下，如何设计有源系统的硬件部分。与设计生成线性传递行为和低失真输出的无源系统相比，对所有资源（例如材料、能源和制造工作量）的最佳利用变得更加重要。这种新理念，也称为“绿色扬声器设计”，将电声转换的效率和电压灵敏度用作扬声器优化的关键标准。这使得设计标准范例发生变化：电动扬声器中某些固有的非线性被认为是有益的，因为它们使扬声器变得更加高效。

## 1 自适应非线性控制

本节总结了扬声器数字信号处理所提供的新机遇：

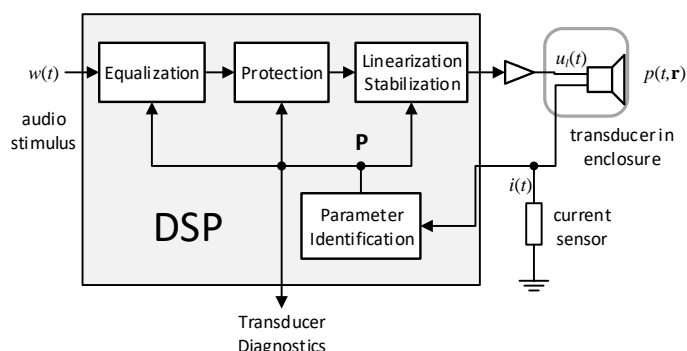


图 1 换能器带自适应非线性控制的有源扬声器系统

图 1 显示了一个自适应非线性控制系统，该系统在扬声器系统的整个使用寿命期间，在数字音频输入  $w(t)$  和声压输出  $p(t, \mathbf{r})$  之间产生所需的线性传递行为，并可靠地保护换能器免受机械和热过载的影响。数字音频信号通过三个以全采样率（例如 48 kHz）和足够大分辨率（>24 位）工作的子系统。第一个子系统是用于均衡频率响应的线性滤波器。第二个是用于扬声器保护的时变线性系统。功放之前的非线性系统使扬声器线性化并使其稳定，还可以消除输出信号中的非线性失真。功放具有恒定的增益，且优先选择具有直流耦合功能的功放，以避免衰减低频补偿信号。

由电感器（例如电阻器）测量的换能器输入电流  $i(t)$  用于识别换能器的时变特性，并根据变化的内外部环境对音频处理加以调整。因此，非线性自适应控制系统可采用通过反馈得到的不断更新的换能器参数  $\mathbf{P}$ 。参数识别可以以较低的采样率（6 - 12

kHz) 进行, 并且不受感测路径中任何时延的影响。参数  $\mathbf{P}$  有其物理意义、高诊断性并且可以存储在存储器中。

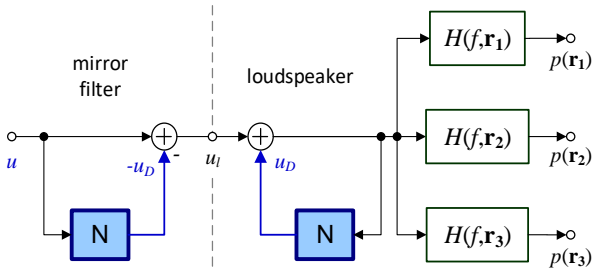


图 2 通过从扬声器非线性模型中导出镜像滤波器可以对无源扬声器系统进行主动线性化和稳定化处理

如图 2 所示, 位于数字音频路径末端的镜像滤波器合成了补偿信号  $-u_D(t)$ , 该信号抵消了扬声器中产生的等效输入失真  $u_D(t)$  [1]。连接到扬声器输入端反馈回路中的子系统  $N$ , 模拟了力因数  $Bl(x)$ , 悬挂刚度  $K_{MS}(x)$ , 机械电阻  $R_{MS}(v)$ , 电感  $L(x, i)$  以及其他扬声器非线性, 这些非线性集总参数取决于音圈位移  $x$ 、速度  $v$ 、输入电流  $i$  和其他状态变量。而在镜像滤波器中, 以前馈方式将子系统  $N$  的副本添加到滤波器输入信号  $u(t)$  中, 以消除谐波和互调失真、直流位移和其他不稳定性, 从而在特定观测点  $\mathbf{r}$  处生成滤波器输入  $u(t)$  和声压输出  $p(t, \mathbf{r})$  之间的线性传递函数  $H(f, \mathbf{r})$  [2]。

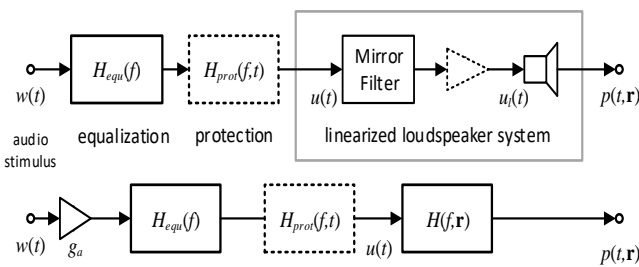


图 3 带有自适应非线性控制的有源扬声器系统的信号流程图

扬声器主动线性化应在定义的行程范围  $|x(t)| < x_{mech}$  内进行, 该位移行程受限于机械限制  $x_{mech}$ , 以此来避免难以确定的且无法通过非线性控制进行消除的冲击型和其他不规则失真 (Rub&Buzz)。此外, 现代功放提供的功率往往超出换能器的承受范

围。为避免机械和热过载所开发的主动保护系统 [3-5] 可以检测出临界状态并在损坏发生之前衰减输入信号。图 1 中保护系统使用了由镜像滤波器 [6] 可靠预测的线圈的位移和温度。

如果未检测到机械或热过载, 保护系统的行为类似于一个线性时变滤波器, 并提供  $H_{prot}(f)=1$  的平坦响应。滤波器产生高通特性, 并衰减低频音频分量, 以使峰值位移保持在允许的峰值  $x_{max}$  以下。而热保护需要衰减对实际输入功率  $P_E$  有显著贡献的信号分量。峰值位移的预测模型可用于更早地激活衰减滤波器, 并在撞击阶段减少可闻缺陷失真 [4]。

可靠的扬声器过载保护系统, 使得可以安全地在控制系统的输入端应用传递函数  $H_{equ}(f)$  进行线性滤波 [7], 从而产生均衡的总系统传递函数, 定义为:

$$H_o(f, \mathbf{r}) = H_{equ}(f)H(f, \mathbf{r}) \quad (1)$$

如图 3 所示, 该总传递函数既不考虑保护系统响应  $H_{prot}(f)$ , 也不考虑功放的增益  $g_a$ 。均衡器无法改变换能器的指向性, 但可以在较低频率下通过使用通用滤波器系统函数 (例如 Butterworth) 将频率响应  $H_o(f, \mathbf{r})$  对准到所需的高通特性形状。无源系统设计中的传统对准 [8] 是通过寻找具有最佳性能的特定换能器和箱体来实现此目标。主动均衡为扬声器设计提供了更大的自由度, 因为可以消除线性化无源系统的有理传递函数  $H(f, \mathbf{r})$  中的零极点, 以此在  $H_o(f, \mathbf{r})$  中生成新的零极点。但是, 均衡可能会增加功放和换能器对功率和电压的要求。

到目前为止讨论的主动控制系统具有前馈结构, 不需要额外的传感器来监测换能器的状态。镜像滤波器、保护系统和均衡器中的控制参数对应于扬声器集总参数模型 [9], 具有实际的物理意义。换能器制造过程中, 对产线终端测试期间收集的数据进行统计分析, 可以提供控制系统所需的最佳参数值, 并存储在控制系统中作为初始参数。尽管控制系统可以使用固定的参数运行, 但是控制参数与实际扬声器参数之间的任何不匹配都会降低性能。因

此, 需要图 1 所示的自适应参数识别方案<sup>[10]</sup>来应对不可避免的生产差异、悬挂系统老化<sup>[11]</sup>以及气候条件变化和其他外部影响<sup>[12]</sup>。

通过使用便宜的电传感器来监测输入电流  $i(t)$ , 可以识别非线性扬声器模型的所有集总参数<sup>[13]</sup>。自适应控制系统还可以简化有源系统中的调节过程, 在产品的使用寿命内, 无论重放音乐还是其他音频信号, 都可以提供准确的传感器参数。如果功放是直流耦合的, 控制系统还可以主动稳定换能器<sup>[14]</sup>, 补偿外部影响 (例如空气负载、重力), 使线圈保持在最佳静止位置, 从而提供最大的交流位移和声输出。

镜像滤波器的前馈结构具有低复杂度, 始终稳定并且不会在音频信号中产生延迟。

如今, 即使在低成本的消费类应用中, 在硅片上构建软件算法 (约 100 MIPS) 所需要的成本也可以与换能器方面产生的效益和成本节省相抗衡。

## 2 效率

如前一章节所示, 数字信号处理可以显著提高再现声音的质量, 但是换能器产生的热损耗限制了最大输出。大部分输入电功率将转换为热量, 只有一小部分 (在微型扬声器中远低于 1%) 可以作为辐射声能。电声转换效率可以有效地评估扬声器特性, 并研究音频激励信号和对音频信号进行数字信号处理产生的影响。

通常, 电声效率定义为声输出功率  $P_a$  与电输入功率  $P_e$  之比。

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} 100\% \quad (2)$$

在时域中, 实际输入功率  $P_e$  可以计算为输入电流  $i(t)$  与功放开路输出电压 (此处称为驱动电压  $u_g(t)$ ) 的乘积在一个测量周期间隔内的平均值:

$$P_e = \overline{u_g(t)i(t)} = \int_0^{+\infty} \Re(Z_E(f)^{-1}) G_u^2(f) df \quad (3)$$

这等效于任意激励信号的电压谱平方  $G_u^2(f)$  与电输入导纳  $Z_E(f)^{-1}$  实部的乘积。

声输出功率  $P_a$  可以通过对扬声器外部闭合表面  $S$  上的远场声压进行积分得到, 在时域和频域中其结果表示为:

$$P_a = \frac{1}{\rho_0 c} \int_S \overline{p(t, \mathbf{r})^2} dS = \frac{1}{\rho_0 c} \int_0^{+\infty} \frac{G_u^2(f)}{Q(f, \mathbf{r}_{ref})} |H(f, \mathbf{r}_{ref})|^2 S df \quad (4)$$

该式使用特定的声阻抗  $\rho_0 c$  以及正弦发生器电压  $u_g$  和参考点  $\mathbf{r}_{ref}$  (通常在参考轴上距离声源  $r_{ref} = 1 \text{ m}$  的位置) 处的声压  $p(t, \mathbf{r}_{ref})$  之间的复传递函数  $H(f, \mathbf{r}_{ref})$  和指向性因子  $Q(f, \mathbf{r}_{ref})$ 。等式 (2) 中的效率  $\eta$  也可表示为:

$$\eta = \frac{\int_0^{+\infty} \eta(f) \Re(Z_E(f)^{-1}) G_u^2(f) df}{\int_0^{+\infty} \Re(Z_E(f)^{-1}) G_u^2(f) df} \quad (5)$$

根据前人对于扬声器效率的论述<sup>[9, 15]</sup>, 频率相关的效率函数可表示为:

$$\eta(f) = \frac{|H(f, r_{ref})|^2 4\pi r_{ref}^2}{\rho_0 c \Re(Z_E(f)^{-1}) Q(f, r_{ref})} 100\% \quad (6)$$

## 3 电压灵敏度

限制有源扬声器系统最大输出的第二个重要因素是功率放大器的峰值电压能力。无源扬声器系统 (例如箱体中的换能器单元) 的电压灵敏度是使换能器与放大器匹配的有用特性。可以将电压灵敏度定义为以 dB 为单位的总声压级:

$$L_{u_{ref}, r_{ref}} = 20 \lg \left( \frac{p_{rms}(r_{ref})}{p_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{1}{p_0^2} \int_0^{+\infty} G_u^2(f) |H(f, r_{ref})|^2 df \right) \quad (7)$$

在给定的轴上参考距离 (通常  $r_{ref} = 1 \text{ m}$ ), 参考声压为  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ 。可由任意激励产生, 该激励具有已知电压幅度谱  $G_u(f)$ , 对应于参考驱动电压 (通常为  $u_{ref} = 1 \text{ V}$ ) 的 rms 值:

$$u_{ref}^2 = \int_0^{+\infty} G_u^2(f) df \quad (8)$$

对于频率为  $f$  的正弦激励, 频率相关的电压灵敏度函数可以表示为:

$$L_{u_{ref}, r_{ref}}(f) = 20 \lg \left( \left| H(f, r_{ref}) \frac{u_{ref}}{p_0} \right| \right) \quad (9)$$

这对于换能器设计是有用的特性，类似于 IEC 标准中定义的频率响应<sup>[16]</sup>。

比较等式 (5) 和 (9) 表明效率和电压灵敏度是相关的，但并不相同。二者均包含轴上传递响应  $H(f, r_{ref})$ ，使得他们在中低频处生成相似的曲线形状。但是，电阻抗  $Z_E(f)$  会提高谐振频率  $f_s$  下的效率。而指向性因子  $Q(f, r_{ref})$  通常会降低较高频率下的效率。

#### 4 扬声器建模

集总参数模型可用于描述安装在挡板中、封闭箱或使用力学谐振器的倒相箱中的换能器单元的轴上传递响应  $H(f, r_{ref})$ 、电输入阻抗  $Z_E(f)$  和频率相关效率。此模型在较高的振幅下也有效，但此时力因数乘积、悬挂系统刚度和音圈电感不再是恒定值  $Bl$ 、 $K_{MS}$  和  $L_E$ ，而是以瞬时音圈位移  $x$  作为自变量的非线性函数  $Bl(x)$ 、 $K_{MS}(x)$  和  $L_E(x)$ 。对于产生具有概率密度函数  $pdf(x)$  的音圈位移  $x$  的特定激励信号，力因数的有效值可表示为：

$$\overline{Bl} = \int_{-\infty}^{\infty} Bl(x) pdf(x) dx \quad (10)$$

悬挂系统的刚度有效值：

$$\overline{K_{MS}} = \int_{-\infty}^{\infty} K_{MS}(x) pdf(x) dx \quad (11)$$

音圈电感的有效值：

$$\overline{L_E} = \int_{-\infty}^{\infty} L_E(x) pdf(x) dx \quad (12)$$

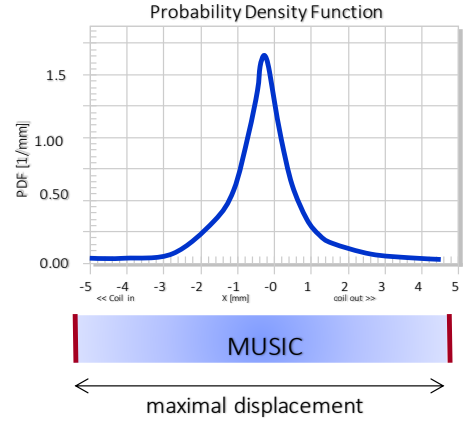


图 4 典型音频信号（例如音乐）的音圈位移  $x$  的概率密度函数  $pdf(x)$

图 4 显示了代表大多数音乐类型和语音的典型音频素材的  $pdf(x)$  示例。这种钟形的曲线特征表明，线圈大部分时间都接近静止位置，而位于峰值处的时候相对较少。因此，从统计学的角度来看，有效参数  $\overline{Bl} \approx Bl$ ， $\overline{K_{MS}} \approx K_{MS}$ ， $\overline{L_E} \approx L_E$  接近于在静止位置  $x=0$  处发现的非线性参数值，并且较小的信号效率和电压灵敏度对于较高的幅度是有用的近似值。

#### 5 实用系统设计

如图 5 所示，本节从系统集成的角度描述绿色扬声器设计的过程，目的在于指定所有组件并确保资源的最佳利用。在下一篇相关论文中，将为换能器设计定义一组具体的物理标准。

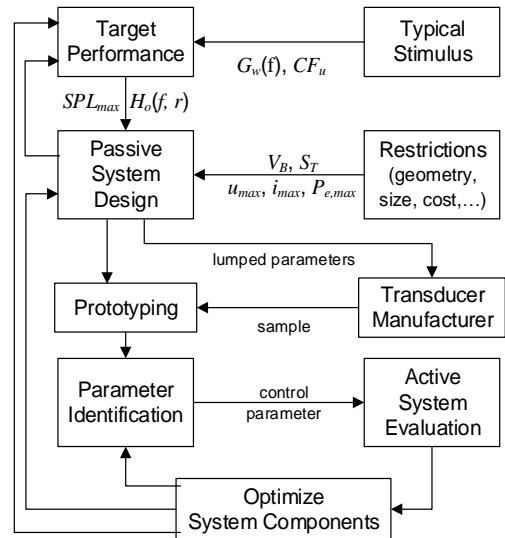


图 5 实际设计过程概览

## 5.1 目标性能规格指标

设计过程从以下参数特征的规定开始：

- 符合 IEC 60268-21<sup>[9]</sup>的轴上距离  $r$  处的最大声压级  $SPL_{max}(r)$ ，而
- 再现特定应用中典型的宽带音频激励信号（音乐、语音），并由该信号的长期幅度频谱  $G_w(f)$ 和波峰因数  $CF_w$  确定，且
- 提供所需的整体频率响应  $H_o(f, r)$ ，并且不需要热保护或机械保护 ( $H_{equ}(f)=1$ )

因此，利用图 3 所示，在控制输入端使用功放增益  $g_a$ ，最大 SPL 输出可以表示为：

$$SPL_{max} = 20 \lg \left( \frac{g_a}{p_0} \int_0^{+\infty} G_w(f) |H_o(f, r)| df \right) \quad (13)$$

可以通过简单的特性参数，例如截止频率  $f_c$ 、品质因数、对准滤波器类型（如 Butterworth），或通过用  $H_o(f, r)$ 的有理数表示的极点和零点来指定整个传递函数  $H_o(f, r)$ 的所需频率响应形状。

设计过程必须考虑目标应用中的其他限制和特定要求，例如

- 可用的箱体尺寸（体积  $V_B$ ）
- 总辐射面积  $S_T$ ，包括振膜面积  $S_D$ 、无源辐射器面积  $S_R$ 和面板尺寸
- 最大峰值电压  $U_{max}$
- 最大峰值电流  $i_{max}$
- 最大电功率  $P_{e,max}$
- 其他限制条件（价格、重量等）

最大峰值电压  $u_{max}$ 和峰值电流  $i_{max}$ 通常受 H 桥中轨电压与场效应管 FET 和 D 类功放的限制。最大功率  $P_{e,max}$ 可由功放连续地 (>100h) 提供给换能器，且不会在功放输出级、电源或音圈中引起热过载<sup>[16]</sup>。

Passive Loudspeaker System + Control	Small Size	Small Radiator	Equalization $f < f_0$	Sensitivity	Efficiency	Low Cost
Closed-Box	+	+	+	-	-	+
Vented-Box	-	+	-	+	+	+
Passive Radiator	+	-	-	+	+	-
Band-Pass	-	+	+	+	+	+
Panel	-	-	+	+	+	+

表 1 在无源扬声器系统中应用非线性控制的优点 (+) 和缺点 (-) 一览表

## 5.2 无源系统设计

设计过程的第二步为确定机械和声学组件（面板、无源辐射器、箱体、号角、传输线等）的最佳设计及所需换能器特性的规格。表 1 概述了几款最流行的无源系统类型，并显示了它们在目标性能及其在电控制适用性方面的优点 (+) 和缺点 (-)：

封闭式系统是以最小的成本实现小型扬声器的最佳选择，但低于系统谐振  $f_0$ 时，其效率和灵敏度却最低。对低频进行主动均衡可以将截止频率  $f_c$  下拉 1-2 个倍频程。这种低频延伸无法应用于倒相箱和无源辐射器系统，因为这两类系统在共振频率以下滚降陡峭。但是，在效率和电压灵敏度至关重要的便携式和专业应用中，最好使用附加谐振器。平板系统代表了使用可用组件（例如显示器）作为辐射体的任何其他分布式模式系统。

在选择最佳系统类型后，根据给定的箱体体积  $V_B$ 和总辐射面积  $S_T$ ，设计声学 and 机械元件（端口、前腔、后腔、面板）的尺寸和形状。传统的无源设计方法中，优化给定换能器的箱体以及其他机械和声学元件，以生成所需的频率响应形状（对准曲线）和通带灵敏度。而绿色扬声器设计与之不同，在优化了无源系统效率的同时产生了在 5.1 节中定义条件下所需的输出信号。控制系统输入端的主动均衡始终提供所需的整体传递函数  $H_o(f)$ ，但需要仔细考虑功放和换能器的功率处理能力。

换能器的辐射面积  $S_D$  决定了机电式换能器部件与声学系统之间的耦合，并且对无源系统的效率产生了很大影响。数值仿真可用于找到无源系统中有效辐射面积  $S_D$  和其他集总参数的最佳值，从而使等式 (5) 中的效率  $\eta$  在电压谱为  $G_u(f)$  的典型激励信号下达到最大。由于电压谱  $G_u(f)$  取决于所用程序材料和由  $G_w(f)$  与  $H_{equ}(f)$  表示的均衡，因此 5.1 节中定义的目标性能对最终系统设计有很大影响。

如果电输入功率  $P_e$  或端电压峰值  $u_{pk}$  和输入电流峰值  $i_{pk}$  超过允许的极限值  $P_{e,max}$ 、 $u_{max}$  和  $i_{max}$ ，则必须考虑具有较小的长音圈、软悬挂系统、附加谐振器以及其他设计选择的非线性电机来提高无源系统的效率。如果仅是功放的电压能力不足，则可以通过减小直流电阻  $R_E$  来提高以 dB 表示的电压灵敏度。同样，较高的  $R_E$  值也可以减小峰值电流  $i_{pk}$ 。

根据 IEC 62458 标准<sup>[18]</sup>，峰值位移  $x_{pk}$  不得超过最大位移  $x_{mech}$ 。最大位移  $x_{mech}$  定义了可用工作范围的正负限制，在此范围内没有机械限制、音圈摩擦或其他不规则行为<sup>[16]</sup>。

无源扬声器系统的性能可以通过使用现有样本的线性、非线性和热参数的大信号建模或通过有限元分析得到的虚拟设计选择来更详细地预测。

### 5.3 原型制作

下一步需要一个真正的换能器，进行无源扬声器系统的原型制作。在这一点上，必须考虑其他因素，例如成本、制造难易程度、产品的坚固性和可靠性，并需做出进一步的折衷处理。

### 5.4 初始参数识别

如果是第一次在无源扬声器系统上激活非线性控制，则一次性识别过程（类似于大信号识别<sup>[19]</sup>）将自动激活。此测量使用宽带激励信号，并提供安装在无源系统中的换能器的所有线性、非线性和热参数。同时，它会根据通用保护值，例如非线性参数变化 ( $Bl_{min}$ 、 $C_{min}$ )、最大音圈温升  $T_{max}$  和最大电输入功率  $P_{e,max}$ ，来确定允许的工作范围。

### 5.5 有源系统评估

在受控扬声器系统（具有相同类型的任意喇叭单元）通电后，所识别的换能器参数将作为初始控制参数被保存。具有电流监测功能的自适应控制可在再现自然音频激励信号和人工测试信号的同时，提供有关特定设备内部状态的更新参数和诊断信息。

在再现频谱为  $G_w(f)$  和波峰因数为  $CF_w$  的多音或噪声信号时，通过监测输入功率  $P_e$  和换能器的终端电压和电流峰值、测量 SPL 输出来评估目标性能。

通过标准测量技术<sup>[19]</sup>可轻松检查非线性失真的消除情况，包括谐波失真、互调失真和代表音圈摩擦、漏气和其他扬声器缺陷的脉冲型失真。要评估音乐或任何其他具有密集频谱的音频激励信号的失真降低效果，需要一种将非线性失真（残差）与所需线性部分分离的测量技术<sup>[16]</sup>。残差可在时域和频域中进行分析，是感知建模、失真可听化和系统听音测试<sup>[20]</sup>的基础，这些可以用来确定剩余失真分量的可听性和烦扰性。

基于电流监测的自适应扬声器系统允许对各种程序材料进行独立的自检，以检查设计过程中所做的假设，同时评估悬挂系统的老化和其他关键硬件组件的长期性能。

### 5.6 系统优化

上面的评估为优化目标性能以及选择或设计更好的硬件组件提供了有价值的信息。如果没有时间进行大幅度更改，则可以修改控制软件中的保护参数和目标对齐方式，以应对硬件中的未知限制。这通常需要对开发过程的最后步骤进行额外的重复。例如，可以通过减小小机械保护系统中的峰值位移  $x_{max}$  来避免在较高振幅下发生的音圈擦圈。如果由于箱体中的传热受阻而使换能器的功率处理能力低于预期，热保护系统则可以提供一种快速过渡的解决方案，直到可以使用效率更高且传热效果更好的换能器为止。

## 6 结论

有源音频设备中可用的数字信号处理改变了无源换能器设计的范例。从所有资源的最佳利用出发,电声效率  $\eta$  是评估换能器和系统设计的重要标准。在较小的扬声器系统中产生更多输出,以及在电池容量有限的便携式应用中降低功耗,提高效率是关键。

效率  $\eta$  与传感器的灵敏度  $L_{IV,Im}$  不同。灵敏度  $L_{IV,Im}$  需要使传感器与功放的峰值电压能力匹配。效率和灵敏度的瞬时值取决于提供给扬声器的特定激励信号。 $\eta$  和  $L_{IV,Im}$  的平均值可以通过使用频率相关的效率函数  $\eta(f)$  和灵敏度函数  $L_{IV,Im}(f)$  以及代表典型程序材料的电压谱  $G_u(f)$  和概率密度函数  $pdf(u)$  计算得到。

由 FEA 预测或由换能器模型测量的集总参数是评估设计选择和研究其对灵敏度和效率影响的合适基础。而换能器的实际谐振频率  $f_s$  和品质因数  $Q_{TS}$ ,  $Q_{MS}$  和  $Q_{ES}$  在绿色扬声器设计中起次要作用,因为这些由于生产差异、老化和外部影响(气候)产生的随时间变化很大的特性可以很容易通过自适应控制进行补偿。

## 参考文献

- [1] W. Klippel, "The Mirror Filter - a New Basis for Reducing Nonlinear Distortion Reduction and Equalizing Response in Woofer Systems", J. Audio Eng. Soc. vol. 32, no. 9, pp. 675-691, (1992).
- [2] W. Klippel, "Loudspeaker Nonlinearities – Causes Parameters, Symptoms," J. Audio Eng. Soc. vol. 54, no. 10, pp 907 – 939 (Oct. 2006).
- [3] G. Vignon and S. Scarlett, "Specifying Xmax for Micro-speakers and Smart Amplifiers", presented at the 137th Convention of the Audio Eng. Soc. 2014, Oct. 9-12th, Los Angeles, USA, preprint 9114.
- [4] W. Klippel, "Mechanical Overload Protection of Loudspeaker Systems," J. Audio Eng. Soc. vol. 64, no. 10, pp. 771 – 783 (2016).
- [5] K. M. Pedersen, "Thermal Overload Protection of High-Frequency Loudspeakers," Rep. of final year dissertation, Salford University, UK (2002).
- [6] W. Klippel, "Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers," J. Audio Eng. Soc. vol. 52, no. 1/2, pp. 3-25, (2004).

- [7] G. Ramos, J. Lopez, "Filter Design Method for Loudspeaker Equalization Based on IIR Parametric Filters," J. Audio Eng. Soc., vol. 54, no. 12 pp. 1162-1178 (2006).
- [8] R. Small, "Direct Radiator Loudspeaker System Analysis," J. Audio Eng. Soc. vol. 20, no. 5, pp. 307-327 (1972).
- [9] L. Beranek, T. Mellow, "Acoustics: Sound Field and Transducers," Academic Press, Amsterdam, 2012.
- [10] W. Klippel, "Adaptive Nonlinear Control of Loudspeaker Systems," J. Audio Eng. Soc. vol. 46, pp. 939 - 954 (1998).
- [11] W. Klippel, "Mechanical Fatigue and Load-Induced Aging of Loudspeaker Suspension," presented at the 131st Convention of Audio Eng. Soc. 2011, Oct. 20-23, NY, USA, preprint 8474.
- [12] F. Agerkvist and B. R. Pedersen, "Time-varying Behavior of the Loudspeaker Suspension: Displacement Level Dependency," presented at the 127th Convention of the Audio Engineering Society, New York, 2009, preprint 7902.
- [13] W. Klippel, "Nonlinear Adaptive Controller for Loudspeakers with Current Sensor," presented at the 106th Convention of the Audio Eng. Soc., Munich, May 1999, preprint 4864.
- [14] W. Klippel, "Adaptive Stabilization of Electrodynamic Transducers," J. Audio Eng. Soc. vol. 63, no. 3, pp. 154-160 (2015).
- [15] D. B. Keele, "Maximum Efficiency of Direct Radiator Loudspeakers," presented at the 91st Convention of the Audio Eng. Soc., Oct. 1991, preprint 3193.
- [16] IEC 60268-21: Sound System Equipment – Part Acoustical (Output Based) Measurements, 2018.
- [17] U. Skov, R. Christensen, "An Investigation of Loudspeaker Simulation Efficiency and Accuracy Using a Conventional Model, a Near-to-Far-Field Transformation, and the Rayleigh Integral," presented at the 136th Convention of the Audio Eng. Soc. (April 2014), preprint 9057.
- [18] IEC 62458:2010 Sound System Equipment – Electro-acoustical Transducers – Measurement of Large Signal Parameters.
- [19] W. Klippel, "Measurement of Large-Signal Parameters of Electrodynamic Transducer," presented at the 107th Convention of the Audio Eng. Soc. (September 1999), preprint 5008.
- [20] W. Klippel, "Auralization of Signal Distortion in Audio Systems, Part 1: Generic Modeling," presented at the 51st Int. Conference of the Audio Eng. Soc. on "Loudspeakers and Headphones", Helsinki, Finland, (August 2013), paper no. 2-1.
- [21] S. Irrgang, W. Klippel, "Audio System Evaluation with Music Signals," presented at International Conference on Automotive Audio 2017 of the Audio Eng. Society (August 2017), paper no. P4-2.