

前馈型低频非线性失真补偿器的仿真与实验

韦峻峰¹, 冯海泓¹, 张平²

(1. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032; 2. 中国科学院嘉兴(工程)中心声学所分中心, 浙江嘉兴 314006)

摘要: 扬声器工作在大振幅时声信号中存在显著的非线性失真, 该失真可通过常规非线性失真补偿技术减少。对一种基于反馈线性化理论的前馈型非线性失真补偿器进行了分析讨论, 通过仿真得到了单个扬声器参数变化对补偿器性能的影响情况, 并通过对扬声器样品的实验评估了补偿器的实际性能。实验结果表明, 使用补偿器后扬声器响应的低频部分谐波失真减少约 10dB, 而基频响应未发生改变。前馈型非线性失真补偿器可有效减小扬声器的常规非线性失真, 可应用于多种扬声器系统中。

关键词: 扬声器; 非线性失真; 反馈线性化; 前馈补偿器

中图分类号: TN912

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2011)-05-0432-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2011.05.012

Computational and experimental study of low frequency nonlinear distortion compensator with feed-forward structure

WEI Jun-feng¹, FENG Hai-hong¹, ZHANG Ping²

(1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China;

2. Institute of Acoustics, Jiaxing Research and Commercialization Center for Technology, Chinese Academy of Sciences, Jiaxing 314006, Zhejiang, China)

Abstract: When a loudspeaker works with large displacement, nonlinear distortion can be found obviously in sound response signal. The distortion can be reduced by compensation techniques for regular nonlinear distortion. A feed-forward compensator for this purpose, which is based on the theory of feedback linearization, is discussed in this paper. The effects of the variation of loudspeaker parameters on the performance of the compensator are evaluated by simulation. The actual performance of the compensator is evaluated by experiments on loudspeaker samples. Results show that harmonic distortions at low frequency are reduced by about 10dB after compensation, while the fundamental response has no change. Therefore, the regular nonlinear distortion of loudspeaker response can be effectively reduced by the feedforward compensator, and the compensator can be applied to various loudspeaker systems.

Key words: loudspeaker; nonlinear distortion; feedback linearization; feedforward compensator

0 引言

扬声器的常规非线性失真是由扬声器的设计结构、部件材料和制造工艺决定的^[1], 无论是合格样品还是不合格样品都存在非线性失真。目前减小扬声器非线性失真的主要方法是改变扬声器的结构和材料^[2,3], 由传感器的模拟信号反馈补偿和通过信号处理技术减小常规非线性失真的技术还处于实验室阶段。在 1985 年前后的研究中, 研究人员通过将振膜加速度反馈到输入端实现失真补偿^[4]。在数字技术广泛使用后, 1992 年后出现了多种常规非线性失真补偿器, 例如 Frank 提出的逆 Volterra

核函数补偿器^[5]、Gao 提出的自适应控制补偿器^[6]和 Suykens 提出的反馈线性化补偿器^[7]。Suykens 在模拟反馈控制方法的基础上, 使用了反馈线性化理论, 获得了扬声器状态空间模型的非线性状态反馈规律, 使非线性系统线性化。Klippel 将其发明的镜像滤波器法应用于常规非线性失真补偿, 得到了较为简单的补偿器结构^[8], 而后被证明该补偿器是反馈线性化补偿器中的一种特殊情况^[9]。

反馈型补偿器的系统中使用了振动传感器, 使该技术的应用场合受到很大限制。针对这一问题, Hans 提出了前馈型补偿器结构^[10]。通过事先对扬声器参数的辨识, 将扬声器参数存储于前馈补偿器中, 由扬声器的输入端信号预测扬声器的状态量, 从而省去了使用传感器测量状态量。

为了将前馈型非线性失真补偿器应用于扬声器的非线性失真补偿, 本文简要地介绍了补偿器的推导过程, 而后对补偿器的补偿效果进行了数值仿

收稿日期: 2011-05-05; 修回日期: 2011-07-27

作者简介: 韦峻峰(1984—), 男, 广西南宁人, 博士生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 韦峻峰, E-mail: wjfs@163.com

真, 并考察了不同的扬声器参数变化对补偿效果的影响。最后在实验系统中验证了前馈型非线性失真补偿器的实际补偿效果。

1 前馈型非线性失真补偿器

前馈型非线性失真补偿器是由反馈线性化补偿器改进而来的。下面介绍用于扬声器常规非线性失真补偿的反馈线性化补偿器, 之后将状态预测器引入该补偿器, 使之免除对扬声器状态量实时测量的需求, 从而构成前馈型非线性失真补偿器。

1.1 反馈线性化补偿器

由反馈控制系统可以推导出一种补偿器结构, 如图 1 所示。其工作原理可概括如下: 逆动态处理器的结构与被补偿系统相对应, 将被补偿系统的状态量 $\mathbf{x}(t)$ 反馈到逆动态处理器中, 处理器根据状态量 $\mathbf{x}(t)$ 对输入 $v(t)$ 进行预失真, 得到可抵消被补偿系统的非线性失真成分的预失真信号 $u(t)$; 将预失真信号 $u(t)$ 送入被补偿扬声器, 系统的响应中非线性部分被抵消, 从而使整个系统近似为线性系统。

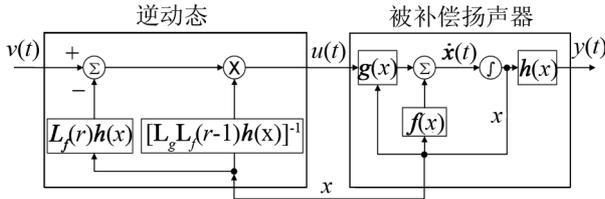


图 1 反馈线性化补偿器
Fig.1 Feedback linearization compensator

若已知被补偿非线性系统的模型, 则可以使用非线性系统控制理论中的反馈线性化方法求解逆动态处理器的结构。反馈线性化方法的基本思想是先用代数变换将一个非线性系统的动态特性变换成线性的动态特性, 再用熟知的线性控制理论进行设计。反馈线性化可通过微分几何方法或动态逆方法实现。微分几何方法是在线性系统几何方法的状态空间概念基础上, 引入微分几何的数学概念发展起来的一支专门的非线性控制理论。下面简单介绍使用微分几何法推导反馈线性化补偿器的方法^[11]。

使用一阶微分方程表示单输入单输出仿射非线性控制系统, 如

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{g}(\mathbf{x}(t))u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = h(\mathbf{x}(t)) \quad (2)$$

其中 $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量, 系统反馈函数 \mathbf{f} 、输入函数 \mathbf{g} 、输出函数 h 都与状态向量 \mathbf{x} 有关。在反馈线性化理论中, 通过对状态向量 $\mathbf{x}(t)$ 进行坐标变换, 可以在

输入信号和输出信号间建立线性关系。具体地说, 在一定条件下, 若对输出 $y(t)$ 关于 t 求 n 阶导数, 最终求导的结果只与输入 $u(t)$ 相关。通过运算, 可以求出上述求导的逆过程, 用于抵消系统中的非线性。

1.1.1 扬声器非线性模型

要求出逆动态的结构, 首先需要了解被补偿系统——扬声器的模型。图 2 给出了扬声器大信号下的阻抗类比形式的等效电路^[12]。

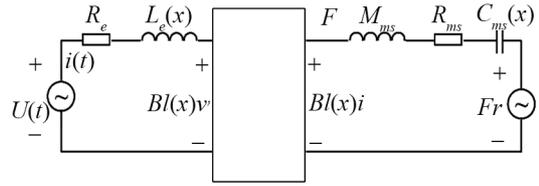


图 2 动圈扬声器大信号等效电路
Fig.2 Large-signal equivalent circuit of moving-coil loudspeaker

图中 R_e 为音圈直流电阻, R_{ms} 为机械系统的力阻, M_{ms} 为机械系统总等效质量, 包含扬声器振膜质量、音圈质量和空气负载的等效质量。 $L_e(x)$ 、 $Bl(x)$ 和 $C_{ms}(x)$ 分别为与音圈位移相关的音圈电感、力系数和悬挂系统的顺性。 F_r 是磁吸力, 通常近似为

$$F_r(x, i) = -\frac{i^2(t)}{2} \frac{\partial L_e(x)}{\partial x} \quad (3)$$

由图 2 得大信号等效电路的微分方程组如下:

$$u = iR_e + ivdL_e(x)/dx + L_e(x) di/dt + Bl(x)v \quad (4)$$

$$F = Bl(x)i = M_{ms}a + R_{ms}v + x/C_{ms}(x) + F_r \quad (5)$$

令状态量 $\mathbf{x}(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [i(t) \ x(t) \ dx/dt]^T$, 可以写出扬声器的状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_e}{L_e(x_2)} & 0 & -\frac{Bl(x_2) + x_1 D}{L_e(x_2)} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{2Bl(x_2) + x_1 D}{2M_{ms}} & -\frac{K'_{ms}(x_2)}{M_{ms}} & -\frac{R_{ms}}{M_{ms}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L_e(x_2) \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (6)$$

式(6)中 $D = dL_e(x_2)/dx_2$ 。

1.1.2 逆动态

对状态方程输出求导, 直到 $L_g L_f^{(r-1)} h(\mathbf{x}(t))$ 不等于零, 即出现包含输入 $u(t)$ 的项。为简便起见, 在推导过程中使用 $L_e'(x_2)$ 表示 $L_e(x)$ 对位移 x_2 的 1 阶导数, $L_e''(x_2)$ 表示 $L_e(x)$ 对位移 x_2 的 2 阶导数, $K'(x_2)$ 和 $Bl'(x_2)$ 上的撇号也表示对位移 x_2 的求导。由扬声器的非线性状态空间模型推导出逆动态为

$$\begin{aligned}
 u = & \alpha(x) + \beta(x)v = L_e(x_2)/[Bl(x_2) + L_e'(x_2)x_1] \\
 & \{x_3[K'(x_2)x_2 + K(x_2) - Bl'(x_2)x_1 - R_{ms}^2/M_{ms} - \\
 & L_e''(x_2)x_1^2/2] - R_{ms}K(x_2)x_2/M_{ms} - R_{ms}x_1 + \\
 & [Bl(x_2) + L_e'(x_2)x_1/2]/M_{ms} + M_{ms}v\} \\
 & R_e x_1 + Bl(x_2)x_3 + L_e'(x_2)x_1x_3
 \end{aligned} \tag{7}$$

1.2 前馈补偿器

反馈线性化补偿器的逆动态需要从被补偿扬声器中获得反馈状态量 x ，而在扬声器状态的方程中，状态量包括音圈的位移、速度和流过音圈的电流。这些参数如果通过外部测量获取，将使系统硬件变得非常复杂。为避免这一问题，可以在非线性失真补偿系统中引入状态预测器，由当前状态预测出扬声器在下一时刻的振膜位移、振动速度、加速度和音圈电流。

状态预测器是一只虚拟的扬声器，通过参数辨识令其参数与被补偿扬声器一致，从而预测输入为 $u(t)$ 时扬声器的状态，其表达式为式(6)。

另一方面，我们希望扬声器的输出响应中非线性响应尽可能小，而线性响应不发生变化，因此需要在 $v(t)$ 前加入一个传递函数 $H_{ld}(s)$ 以保留扬声器的线性输入输出关系。这一部分称为线性动态 (Linear Dynamics)。使用新状态变量 $z = [z_1 \ z_2 \ z_3]^T = [x \ dx/dt \ d^2x/dt^2]^T = [x_2 \ x_3 \ \dot{x}_3]^T$ ，并令输入为 w ，将扬声器的线性传递函数写成如下形式：

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_3 = & -z_1 R_e k_0 / (M_{ms} l_0) - \\
 & z_2 (R_e R_{ms} + k_0 l_0 + b_0^2) / (M_{ms} l_0) - \\
 & z_3 (R_e M_{ms} + R_{ms} l_0) / (M_{ms} l_0) + b_0 w / (M_{ms} l_0)
 \end{aligned} \tag{8}$$

将线性动态和逆动态进行合并化简，求得前馈型扬声器非线性失真补偿器的输入 $w(t)$ 与输出 $u(t)$ 的时域关系为

$$\begin{aligned}
 u(t) = & L_e(x_2)/[Bl(x_2) + L_e'(x_2)x_1] \cdot \\
 & \{[K'(x_2)x_2 + K(x_2) - k_0 - Bl'(x_2)x_1 - b_0^2/l_0 - \\
 & L_e''(x_2)x_1^2/2]x_3 + [K(x_2) - k_0]R_e x_2/l_0 - \\
 & [2Bl(x_2) + L_e'(x_2)x_1]R_e x_1/2l_0 + b_0 w(t)/l_0\} + \\
 & R_e x_1 + Bl(x_2)x_3 + L_e'(x_2)x_1x_3
 \end{aligned} \tag{9}$$

形成如图 3 所示的结构^[10]。与图 1 相比较可以发现，前馈补偿器中引入了状态预测器，由预失真输出 $u(t)$ 预测得到扬声器状态量 \hat{x} ，避免了使用反馈线性化补偿器时测量扬声器状态量的需求。

1.3 离散时间系统中的实现

可使用前向欧拉法将上述前馈型补偿器转换至离散时间域，以便进行仿真和系统实现。设采样间隔为 T_s ，那么将 $x(t_{n+1})$ 在 t_n 时刻用泰勒展开，有 $x(t_{n+1}) = x(t_n + T_s) = x(t_n) + x'(t_n)T_s + x''(\xi_n)T_s^2/2$ (10)

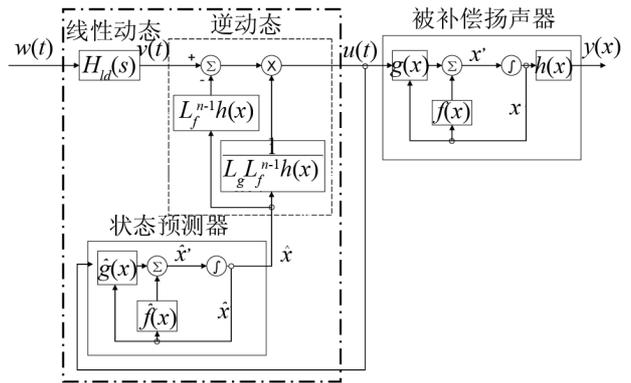


图 3 前馈补偿器
Fig.3 Feedforward compensator

其中， $\xi_n \in (t_n, t_n + T_s)$ ，在离散时间系统中近似为 $x(n+1) \approx x(n) + T_s dx(n)/dt$ (11)

局部截断误差为 $x''(\xi_n)T_s^2/2$ 。可见，近似到离散时间系统后的误差由采样时间和斜率变化率共同决定。在斜率变化率很大时，要减小误差则需要保证采样频率尽可能高。即

$$dx(n)/dt = [x(n+1) - x(n)]/T_s \tag{12}$$

对式(6)使用前向欧拉法离散化，可由 n 时刻系统的状态求出 $n+1$ 时刻状态：

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x_1(n+1) \\ x_2(n+1) \\ x_3(n+1) \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R_e}{L_e(x_2)} & 0 & -T_s \frac{Bl(x_2) + x_1 \cdot D}{L_e(x_2)} \\ 0 & 1 & T_s \\ T_s \frac{2Bl(x_2) + x_1 \cdot D}{2M_{ms}} & -T_s \frac{K_{ms}(x_2)}{M_{ms}} & 1 - T_s \frac{R_{ms}}{M_{ms}} \end{bmatrix} \cdot \\
 \begin{bmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ x_3(n) \end{bmatrix} + & \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_e(x_2)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u(n)
 \end{aligned} \tag{13}$$

然后将前馈补偿器输入 $w(n)$ 和预测的状态 $x(n)$ 代入式(9)，求得预失真信号 $u(n)$ 。预失真信号被数模转换后，经功放放大送入被补偿扬声器。

2 仿真结果

上一节介绍了前馈型非线性失真补偿器的结构，以下将通过仿真评估其补偿性能。

2.1 补偿效果仿真

图 4、5 分别给出了典型的扬声器使用前馈补偿器补偿前后的位移响应及 2~5 阶谐波失真。从图中可见，前馈补偿器理论上可将常规非线性效应在低频引起的失真效应大大降低，各阶谐波失真减少 70 dB 以上，结果好于 Volterra 逆滤波器的补偿效果。

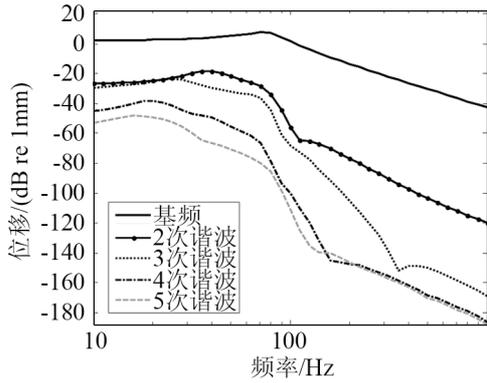


图 4 补偿前的位移响应仿真结果

Fig.4 Simulation results of displacement responses before compensation

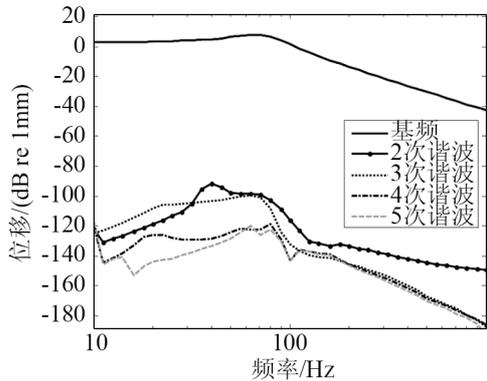


图 5 补偿后的位移响应仿真结果

Fig.5 Simulation results of displacement responses after compensation

2.2 误差分析

扬声器的参数发生变化时, 前馈补偿器的状态预测器部分预测的状态结果将与实际结果存在误差, 造成补偿器性能下降。逐个改变仿真中扬声器状态空间模型的各个参数, 可以评估单个参数对最终补偿效果的影响。令状态预测器参数与被补偿扬声器的参数相等时, 预失真信号送入扬声器模型输出的总谐波失真为理想值; 将扬声器状态空间模型中的各个参数由 50%变化到 150%, 每次步进 10%, 取总谐波失真最大时的结果作为该参数引起的补偿误差。

图 6 给出了补偿器在补偿前后的总谐波失真, 图 7 给出了单个线性参数或非线性参数在指定范围内变化时, 由误差导致的最大总谐波失真值。可见线性参数中刚度系数 k_0 、音圈电阻 R_e 、力系数 b_0 和等效振动质量 M_{ms} 的变化会引起补偿效果的恶化。在这些参数中, k_0 的误差还会导致补偿后的失真高于补偿前的失真。

非线性参数的 1 阶、2 阶幂级数系数在 50%~150%变化范围内导致的补偿误差则相对较小, 见图 8。力系数 $B_l(x)$ 和刚度系数 $K(x)$ 的变化会导致补偿效果恶化, 但没有线性参数的影响效果显著。

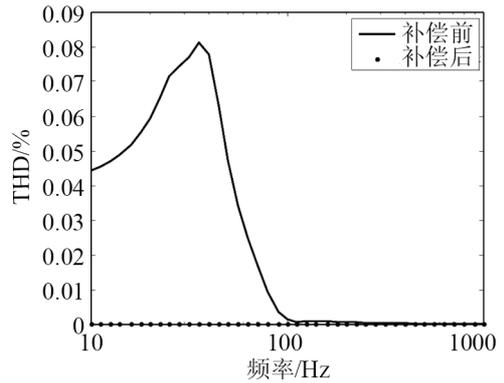


图 6 补偿前后的总谐波失真

Fig.6 Comparison between total harmonic distortions before and after compensation

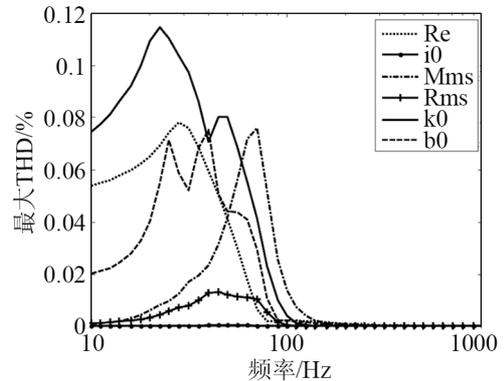


图 7 单个线性参数变化导致最大失真

Fig.7 Maximum distortion caused by the variation of a single linear parameter

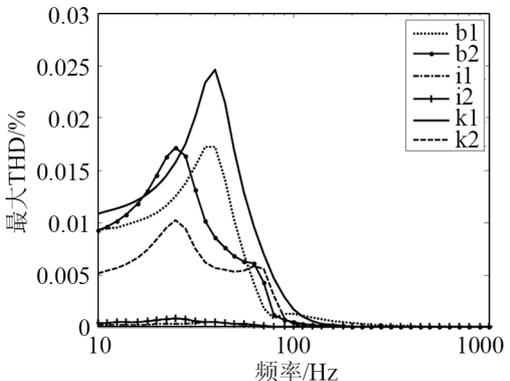


图 8 单个非线性参数变化导致最大失真

Fig.8 Maximum distortion caused by the variation of a single nonlinear parameter

根据上述结果, 可以对扬声器的参数辨识器和补偿器进行化简, 降低系统的复杂度。

3 实验结果

实验框图如图 9 所示。虚线框内的部分为非线性失真补偿验证部分。通过传声器和激光位移传感器, 可以分别测量得到扬声器的声响应、位移响应的基频响应和谐波响应, 从而考察使用补偿器和不使用补偿器时各阶响应幅度的变化。

不同的扬声器参数受环境变化和材料老化等因素的影响程度不同，其中刚度系数 $K_{ms}(x)$ 和音圈电阻 R_e 的变化最为剧烈^[13]，而它们对补偿器的补偿性能影响很大。为避免补偿失效，可采用离线或在线的扬声器的参数辨识技术更新扬声器参数^[14]。图9中使用了两路A/D测量得到扬声器两端的电压和流经扬声器的电流，通过电流响应辨识法^[15]求得扬声器的线性参数和非线性参数。

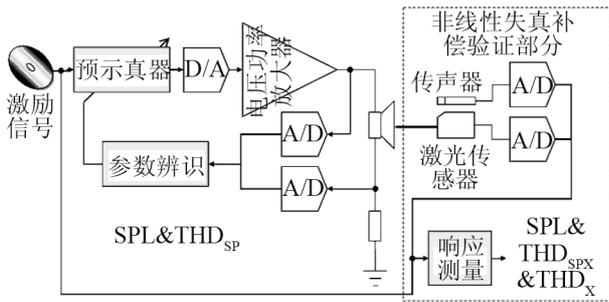


图9 非线性失真补偿验证实验框图

Fig.9 Diagram of the verification experiment of nonlinear distortion compensation

图10、11分别为补偿前后样品的声压响应对比，实线为补偿前的结果，图例中标记“O1”~“O3”分别表示未补偿时的基频响应、2次谐波和3次谐波。补偿前，扬声器的振幅在激励频率小于共振频率处很大(如图12)，扬声器的非线性现象明显，表现为2阶、3阶谐波失真的幅度较高；激励频率大于共振频率之后，振幅以每倍频程12 dB的速度衰减，故扬声器的非线性现象相应地渐弱，表现为2阶、3阶谐波失真的幅度随位移升高而减小至约50 dB。图中的虚线为补偿后的结果，记为“C1”~“C3”。可见补偿后扬声器的基频响应幅度几乎不变，说明线性动态可以很好地还原扬声器的线性响应。而在激励频率小于共振频率处可以观察到声压的2阶、3阶谐波响应幅度减小了10~20 dB，说明逆动态有

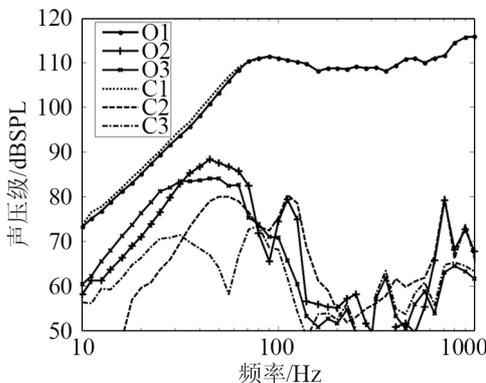


图10 样品A补偿前后声压响应对比

Fig.10 Comparison between sound pressure responses before and after compensation to sample A

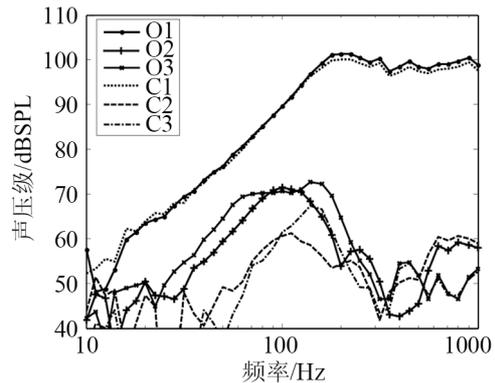


图11 样品B补偿前后声压响应对比

Fig.11 Comparison between sound pressure responses before and after compensation to sample B

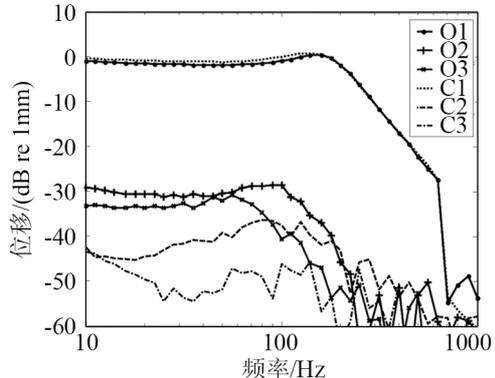


图12 样品B补偿前后位移响应对比

Fig.12 Comparison between displacement responses before and after compensation to sample B

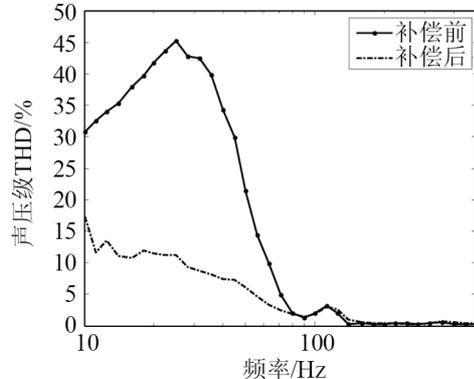


图13 样品A补偿前后声压的总谐波失真对比

Fig.13 Comparison between total harmonic distortions before and after compensation to sample A

效减少了扬声器的2阶、3阶谐波失真。但受到辨识误差的影响，实验结果并不如仿真结果理想。

图13、14分别为补偿前后声响应的总谐波失真对比。扬声器A的总谐波失真由补偿前的40%降至10%，扬声器B的总谐波失真由补偿前的30%降至10%。

4 结论

扬声器工作在大振幅状态时具有明显的常规

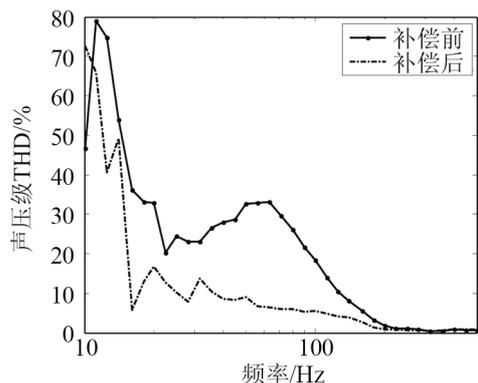


图 14 样品 B 补偿前后声压的总谐波失真对比

Fig.14 Comparison between total harmonic distortions before and after compensation to sample B

非线性失真, 在低频段, 声响应的总谐波失真可高达 70%。本文对一种用于扬声器常规非线性失真补偿的前馈型非线性失真补偿器进行了仿真和实验, 考察了扬声器参数对补偿器补偿效果的影响, 在实验中减少扬声器声响应的低频部分的谐波失真约 10dB, 而线性响应与未补偿时几乎一致。该技术可有效地减小扬声器的常规非线性失真, 改善回放声音的音质, 可应用于多种扬声器系统中。

参 考 文 献

- [1] 王以真. 实用扬声器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
WANG Yizhen. Practical Technology Handbook for Loudspeaker[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [2] Steven Hutt, Loudspeakers Spider Linearity[C]// presented at the AES 108th Convention, 2000-2, Paris, France.
- [3] 董校庭. 扬声器非线性的几种数字补偿方法[J]. 电声技术, 2008, 32(1): 25-33.
- [4] DONG Xiaoting. Digital Compensation Methods for Nonlinearity in Loudspeakers[J]. Audio Engineering, 2008, 32(1), 25-33.
- [5] Greiner R A, Travis M, Sims J R. Loudspeaker Distortion Reduction[J]. J. Audio Eng. Soc., 1984, 32(12): 956-963.
- [6] Frank W, Reger R, Appel U. Loudspeaker Nonlinearities Analysis and compensation[C]// Conf. Record 26th Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, October 1992, 756-760.
- [7] Gao X Y, Snelgrove W M. Adaptive Linearization of a Loudspeaker[C]// ICASSP, 1991, 3: 3589-3592.
- [8] Johan Suykens, Joos Vandevally, Feedback Linearization of Nonlinear Distortion in Electrodynamic Loudspeakers[J]. J. Audio Eng. Soc., 1995, 43(9): 690-694.
- [9] W. Klippel, The Mirror Filter - A New Basis for Reducing Nonlinear Distortion and Equalizing Response in Woofer Systems[J], J. Audio Eng. Soc, 1992, 40(9): 675-691.
- [10] Schurer H. Theoretical and experimental comparison of three methods for compensation of electrodynamic transducer nonlinearity[J]. J. Audio Eng. Soc. 1998, 46(9): 723-740.
- [11] Schurer H. Linearization of electroacoustic transducers[D]. Ph. D. dissertation, Univ. Twente, Enschede, The Netherlands, 1997.
- [12] 胡跃明. 非线性控制系统理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
HU Yueming. Theory and applications of nonlinear control systems[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.
- [13] Klippel W. Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers[J]. J. Audio Eng. Soc. 2004, 52(1): 3-25.
- [14] Bo Rohde Pedersen, Per Rubak, Online Identification of Linear Loudspeakers Parameters[C]// presented at the 122nd Convention 2007 May 5-8 Vienna, Austria.
Bright A. Tracking changes in linear loudspeaker parameters with current feedback[C]// presented at the 115th Convention 2003 October 10-13 New York.
- [15] 韦峻峰, 冯海泓, 陈华, 等. 一种使用电流传感器测量扬声器参数的方法及系统[P]. 中国, 申请号: 201110083837.3.
WEI Junfeng, FENG Haihong, CHEN Hua, et al. A Method and System for Measuring Loudspeaker Parameters by Current Sensor[P]. Application Number: 201110083837.3.