

基于 NFxPEM 算法的调制气流声源的非线性补偿*

周泽民, 曾新吾, 龚昌超, 田章福, 孙海洋
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对调制气流声源存在较强的谐波畸变,将声源系统等效为 Hammerstein 非线性模型,利用该模型下的预失真技术对声源进行非线性补偿研究。根据辨识的 Hammerstein 模型中静态非线性部分带有直流分量的特点,给出了考虑直流分量补偿的预失真算法,并用数值仿真验证了算法的准确性和直流分量补偿的必要性。在非线性和补偿实验中,根据单频信号辨识得到 Hammerstein 模型参数,采用 NFxPEM 算法求得对应的预失真 Wiener 模型参数和预失真波形。实验结果表明,与直接发射相比,补偿发射后声波的功率谱中谐波能量有所下降,而基频能量有小幅度的上升,说明了研究思路的正确性。

关键词: 调制气流声源; Hammerstein 模型; NFxPEM 算法; 非线性补偿

中图分类号: O422.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)06-0126-06

Non-linearity compensation of air-modulated speaker based on the nonlinear filtered-x PEM algorithm

ZHOU Zemin, ZENG Xinwu, GONG Changchao, TIAN Zhangfu, SUN Haiyang

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aimed at the harmonic distortion problem in the air-modulated speaker (AMS), the AMS behavioral model was represented by a Hammerstein structure, and the research on predistortion of AMS based on this model was made. As the DC offset exists in the nonlinearity of the Hammerstein model, a predistortion algorithm considering the DC offset compensation was developed. The validity of the algorithm and the necessity of the DC offset compensation were verified by computer simulation. In the experiment, a single sinusoidal excitation signal was first used to identify the Hammerstein model. Then, using the identified system parameters, the NFxPEM algorithm was performed to obtain the parameters of Wiener predistorter and to predistort the excitation signal. From the experiment results, it is found that our approach is effective in reducing the harmonic power with a relatively small upgrade in the fundamental frequency power.

Key words: air-modulated speaker; Hammerstein model; nonlinear filtered-x PEM algorithm; nonlinearity compensation

调制气流声源是一种通过调制高速气流发声的大功率高压流体声源。它的特点是输出功率可达到万至十万瓦量级,且声波频率响应范围较宽,可以应用于航天强噪声环境测试、远距离广播、低频主动噪声控制^[1-2]和声凝聚^[3]等领域。然而,由于调制气流声源发声所涉及的物理模型和过程比较复杂,在理论上还无法准确预示声源结构与辐射声波特征间的关系,严重阻碍了设计者对声源的控制^[4]。具体来说,调制气流声源表现为明显的非线性系统,往往存在较严重的谐波失真。对于一定的输入功率,谐波能量较高,往往意味着基频的辐射效率较低,这也会影响到调制气流声源相干合成的效果^[5]。

目前,为了减少辐射声波的非线性,已提出和发展了一些预失真方法^[6-7],其主要思想为:将声

源系统等效成一种非线性模型,利用输入信号和测量的声波信号,对该模型进行非线性系统辨识,然后根据得到的系统模型和期望的声波信号设计相应地预失真发射信号。这些研究都是针对于电声源的非线性问题,采用的非线性模型大都为 Volterra 模型。虽然 Volterra 模型可以描述一类广泛的复杂非线性系统,但由于它的收敛问题,该模型更适合应用于弱非线性系统^[8]。Vandersteen 等人认为由静态非线性部分和动态线性部分组成的块联模型更适合描述强非线性系统^[9]。而调制气流声源的非线性主要体现为较强的谐波畸变,这可以由块联模型中的 Hammerstein 模型来描述。针对 Hammerstein 模型的非线性补偿, E. Abd-Elrady 在近期提出用 NFxPEM 算法求解预失真补偿模型的参数,体现出较强的稳健性和

* 收稿日期:2013-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11274387)

作者简介:周泽民(1986-),男,湖南永州人,博士研究生,E-mail: zzm@nudt.edu.cn;

曾新吾(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail: xinwuzeng@nudt.edu.cn

良好的补偿性能,相比 NFxLMS 算法的收敛速度也更快^[10]。那么,本文将首先对声源系统进行 Hammerstein 模型辨识,然后利用离线的 NFxPEM 算法得到预失真模型及波形,并且考虑到辨识的 Hammerstein 模型中静态非线性部分存在一定的直流分量,相应地给出了考虑直流分量补偿的算法。最后,非线性补偿实验的结果表明,测点处声波的谐波能量有着一定程度的降低,而基频的能量有所提升,为调制气流声源的非线性补偿提供了一种有效的途径。

1 调制气流声源的非线性与辨识

实验所用声源为射流式调制气流声源,它是通过收缩式环形喷口完成对高压气流的加速,在其出口形成高速射流。喷口出口处安放有环形音圈,音圈的下部绕有线圈,处于环形强磁场中。当加载调制信号时,线圈受到磁场力作用,使音圈沿轴向上下往复运动,调制喷口面积,使其周期性变化,将断续气流压入喉道,形成脉动声源。该声源的结构复杂,造成声源非线性的因素也会较多。例如:磁场的非线性、动圈-橡胶结构的非线性^[11]、环形音圈的定位不精确,还有发声过程中产生的大量热量可能引起的非线性以及声传播过程中的非线性。此外,气流声源的过压调制过程中产生的声波在理论上就会存在一定程度的非线性谐波畸变^[12]。因此,还没有完善可行的理论模型来描述该声源的非线性特征。如前言提到,针对该声源的特点,本文对声源系统进行 Hammerstein 模型辨识,实验系统的构成如图 1 所示。在测试时,声源的出口直径为 103mm,喷口宽度为 1.5mm,喉道入口宽度为 4mm。辐射器为指数型号筒,入口与声源出口面积匹配,出口直径为 780mm;声场参数测试采用 B&K4193 型传声器,频率响应 0.07Hz~20kHz,动态范围 20.7dB~161dB;传声器处于辐射器的中心轴线上,离辐射器的中心为 2.5m;信号的数模转换和模数转换分别由 NI 公司 USB9233 和 USB9263 完成。

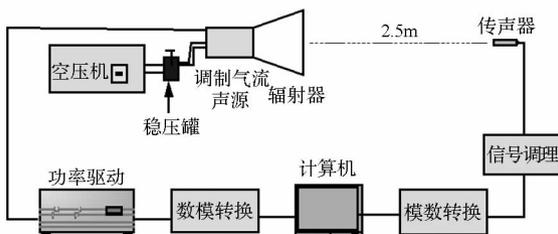


图 1 调制气流声源系统辨识实验框图

Fig. 1 System setup for identification of AMS

具体来说,在气室压力 0.2Mpa、激励电流 7A 的工作条件下,分别发射一定长度的 300Hz 单频信号、数个循环周期的 M 序列,在此同时采集对应的声波信号;对接收信号进行滤波、时间平均和幅值调整后,利用 Matlab 系统辨识工具箱^[13]进行辨识。其中, M 序列对应的系统辨识结果较差,模型输出与待辨识波形的拟合度低;对于单频信号,实测信号的声功率谱如图 2 所示,辨识得到的 Hammerstein 模型中线性部分的分子和分母分别为 3 阶和 5 阶,非线性部分为带有直流分量的 5 阶多项式。为了检验模型辨识结果的精度,将辨识得到的 Hammerstein 模型的输出与辨识的波形进行对比,结果如图 3 所示。从图中可以看出,模型输出与辨识波形基本相符;经计算,两者的拟合度为 87.6%。

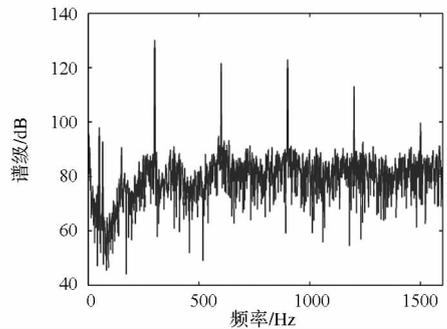


图 2 补偿前调制气流声源的声功率谱

Fig. 2 Power spectrum of the uncompensated output of the AMS

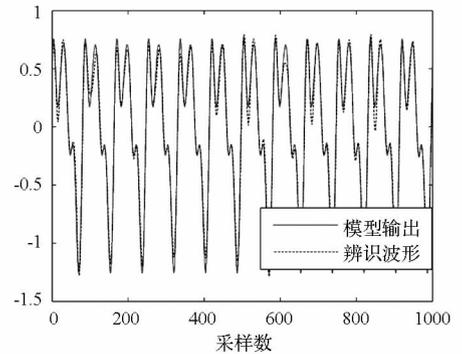


图 3 辨识波形与辨识所得模型对应的输出波形

Fig. 3 Comparison of the estimated signal and the model output

2 非线性补偿的预失真算法

2.1 Hammerstein 模型的补偿原理

声源系统的非线性模型是由 Hammerstein 模型来描述,该模型是由一个无记忆的静态非线性环节 $g(\cdot)$ 和一个动态线性环节 $h(z^{-1})$ 串联构成,如图 4 中(II)框所示。而 Hammerstein 模型

的补偿通常是由 Wiener 预失真模型来完成,可由动态线性环节 $p(z^{-1})$ 和静态非线性环节 $f(x)$ 串联而成,如图 4 中(I)框所示。由于本文声源的非线性主要体现为谐波失真,静态非线性环节 $g(\cdot)$ 可以采用多项式模型。此外,考虑到测量时的声波信号存在直流分量,图 4 中的静态多项式环节也将包含直流分量成分。

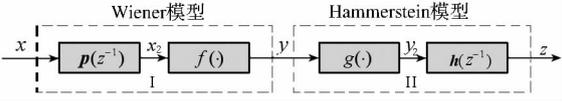


图 4 Hammerstein 模型的非线性补偿

Fig.4 Nonlinearity compensation of Hammerstein system

设 Hammerstein 模型的结构参数已辨识得知,而 Wiener 模型的结构参数会在自适应预失真算法的执行中随时间变化。图 4 中 Hammerstein 模型的输出在时间上可表示为

$$z(n) = \mathbf{h}(z^{-1})y_2(n) = \frac{B(z^{-1})}{1 - A(z^{-1})}y_2(n) = \sum_{m=0}^{m_b} b_m y_2(n - m) + \sum_{m=1}^{m_a} a_m z(n - m) \quad (1)$$

式中, $\mathbf{h}(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{1 - A(z^{-1})}$, 其中多项式 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 分别定义为:

$$A(z^{-1}) = \sum_{m=1}^{m_a} a_m z^{-m}, B(z^{-1}) = \sum_{m=0}^{m_b} b_m z^{-m} \quad (2)$$

这里, z^{-1} 是时延算子,如 $z^{-m}x(n) = x(n - m)$ 。Hammerstein 模型的中间信号 $y_2(n)$ 可定义为

$$y_2(n) = g_0 + g_1 y(n) + g_2 y^2(n) + \dots + g_{m_g} y^{m_g}(n) = \boldsymbol{\theta}_g^T \mathbf{y}(n) \quad (3)$$

其中,

$$\boldsymbol{\theta}_g = (g_0 \ g_1 \ g_2 \ \dots \ g_{m_g})^T \quad (4)$$

$$\mathbf{y}(n) = (1 \ y(n) \ y^2(n) \ \dots \ y^{m_g}(n))^T \quad (5)$$

同样,Wiener 预失真模型的输出可表示为

$$y(n) = f_0(n) + f_1(n)x_2(n) + f_2(n)x_2^2(n) + \dots + f_{m_f}(n)x_2^{m_f}(n) = \boldsymbol{\theta}_f^T(n) \mathbf{x}_2(n) \quad (6)$$

其中,

$$\boldsymbol{\theta}_f^T(n) = (f_0(n) \ f_1(n) \ f_2(n) \ \dots \ f_{m_f}(n))^T \quad (7)$$

$$\mathbf{x}_2(n) = (1 \ x_2(n) \ x_2^2(n) \ \dots \ x_2^{m_f}(n))^T \quad (8)$$

预失真模型内中间信号可表示为

$$x_2(n) = \mathbf{p}(n, z^{-1})x(n) = \frac{D(n, z^{-1})}{1 - C(n, z^{-1})}x(n) = \sum_{m=0}^{m_d} d_m(n)x(n - m) + \sum_{m=1}^{m_c} c_m(n)x_2(n - m) \quad (9)$$

上式中, $\mathbf{p}(n, z^{-1}) = \frac{D(n, z^{-1})}{1 - C(n, z^{-1})}$, 其中多项式 $C(n, z^{-1})$ 和 $D(n, z^{-1})$ 分别定义为:

$$\begin{cases} C(n, z^{-1}) = \sum_{m=1}^{m_c} c_m(n)z^{-m} \\ D(n, z^{-1}) = \sum_{m=0}^{m_d} d_m(n)z^{-m} \end{cases} \quad (10)$$

根据上面的公式表述,将 Wiener 预失真模型中的未知参数矢量 $\boldsymbol{\theta}$ 定义为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta} = (\boldsymbol{\theta}_f^T \ \boldsymbol{\theta}_d^T \ \boldsymbol{\theta}_c^T)^T \\ \boldsymbol{\theta}_f = (f_0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{m_f})^T \\ \boldsymbol{\theta}_d = (d_0 \ d_1 \ \dots \ d_{m_d})^T \\ \boldsymbol{\theta}_c = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{m_c})^T \end{cases} \quad (11)$$

下面将给出考虑直流分量补偿的参数估计算法,用于得到式(11)中的参数矢量 $\boldsymbol{\theta}$ 。

2.2 预失真模型的参数估计算法

Wiener 预失真模型的参数估计可以由 NFxPEM 算法来完成^[10]。NFxPEM 算法是一种自适应的参数估计方法,它将描述的模型用于下一输出的预报,可以给预失真模型提供优异的渐近估计性能,其在 Hammerstein 模型下的预失真结构如图 5 所示。

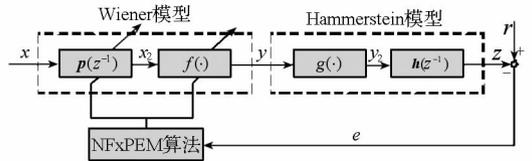


图 5 基于 NFxPEM 算法的自适应预失真结构
Fig.5 Predistortion of Hammerstein system using the NFxPEM algorithm

具体来说,NFxPEM 算法是通过最小化下面的代价函数所获得^[14]:

$$V(\boldsymbol{\theta}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E[e^2(n, \boldsymbol{\theta})] \quad (12)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示为数学期望, $e(n, \boldsymbol{\theta})$ 为输出的预报误差:

$$e(n, \boldsymbol{\theta}) = r(n) - z(n, \boldsymbol{\theta}) \quad (13)$$

这里, $r(n)$ 是参考信号,定义为:

$$r(n) = x(n - \tau) + v(n) \quad (14)$$

上式中 τ 为 Hammerstein 模型的时间延迟, $v(n)$ 为均值为零的加性白高斯噪声。如需补偿的模型为最小相位系统, τ 对应为 0。

NFxPEM 算法的参数更新公式为^[15]:

$$\begin{aligned} \lambda(n) &= \lambda_0 \lambda(n - 1) + 1 - \lambda_0 \\ S(n) &= \boldsymbol{\psi}^T(n) \mathbf{P}(n - 1) \boldsymbol{\psi}(n) + \lambda(n) \\ \mathbf{P}(n) &= \frac{(\mathbf{P}(n - 1) - \mathbf{P}(n - 1) \boldsymbol{\psi}(n) S^{-1}(n) \boldsymbol{\psi}^T(n) \times \mathbf{P}(n - 1))}{\lambda(n)} \\ \boldsymbol{\theta}(n) &= \boldsymbol{\theta}(n - 1) + \mathbf{P}(n) \boldsymbol{\psi}(n) e(n, \boldsymbol{\theta}) \end{aligned} \quad (15)$$

这里 $\lambda(n)$ 是指数增长的遗漏因子,且 $\lambda(\infty) = 1$, λ_0 是比率,它的初始值为 $\lambda(0)$ 为设计变量,一般取 $\lambda_0 = 0.99$, $\lambda(0) = 0.95$ 。 $\mathbf{P}(n) = n\mathbf{R}^{-1}(n)$, 其中 $\mathbf{R}(n)$ 为赫赛行列式近似。 $\mathbf{P}(n)$ 的初始条件为 $\mathbf{P}(0) = \rho\mathbf{I}$, \mathbf{I} 是单位矩阵, ρ 是反映我们置信初始参数矢量 $\boldsymbol{\theta}(0)$ 的常数。如果没有先验知识,即 $\boldsymbol{\theta}(0) = \mathbf{0}$, 而 ρ 的大小会影响到收敛速度,需要仔细选取。式(15)中 $\psi(n)$ 为 $e(n, \boldsymbol{\theta})$ 的负梯度,也就是

$$\psi(n) = -\frac{de(n, \boldsymbol{\theta})}{d\boldsymbol{\theta}} = \frac{dz(n, \boldsymbol{\theta})}{d\boldsymbol{\theta}} \quad (16)$$

设参数矢量 $\boldsymbol{\theta}$ 在每次迭代中变化缓慢,由文献[10]可知, $\frac{dz(n)}{d\boldsymbol{\theta}(n)}$ 可近似为:

$$\frac{dz(n)}{d\boldsymbol{\theta}(n)} \approx \hat{\mathbf{h}}(z^{-1})s_1(n) \begin{pmatrix} \frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_f(n)} & \frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_d(n)} & \frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_c(n)} \end{pmatrix} \quad (17)$$

其中, $\hat{\mathbf{h}}(z^{-1})$ 表示对实际系统中 $\mathbf{h}(z^{-1})$ 的估计。

对于考虑直流分量补偿的情况,本文对上式进行了重新推导,其中 $s_1(n)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} s_1(n) &= \hat{\boldsymbol{\theta}}_g^T \frac{dy(n)}{dy(n)} \\ &= \hat{\boldsymbol{\theta}}_g^T [0 \quad 1 \quad 2y(n) \quad \cdots \quad m_g y^{m_g-1}(n)]^T \end{aligned} \quad (18)$$

式中, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_g$ 是对 Hammerstein 模型中 $\boldsymbol{\theta}_g$ 的估计。根据式(6), (8) 和(9), $\frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_f(n)}$ 可以写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_f(n)} &= \frac{\partial \boldsymbol{\theta}_f^T(n)x_2(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_f(n)} \\ &= x_2^T(n) = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathbf{p}(n, z^{-1})x(n) \\ [\mathbf{p}(n, z^{-1})x(n)]^2 \\ \vdots \\ [\mathbf{p}(n, z^{-1})x(n)]^{m_f} \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (19)$$

同样,根据式(6), (8) 和(9), $\frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_d(n)}$ 和 $\frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_c(n)}$ 可表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_d(n)} = s_2(n) \frac{\partial x_2(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_d(n)} \\ \frac{\partial y(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_c(n)} = s_2(n) \frac{\partial x_2(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_c(n)} \end{cases} \quad (20)$$

式中,

$$\begin{aligned} s_2(n) &= \boldsymbol{\theta}_f^T(n) \frac{\partial x_2(n)}{\partial x_2(n)} \\ &= \boldsymbol{\theta}_f^T(n) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2[\mathbf{p}(n, z^{-1})x(n)] \\ \vdots \\ m_f[\mathbf{p}(n, z^{-1})x(n)]^{m_f-1} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{\partial x_2(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_d(n)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_2(n)}{\partial d_0(n)} \\ \frac{\partial x_2(n)}{\partial d_1(n)} \\ \vdots \\ \frac{\partial x_2(n)}{\partial d_{m_d}(n)} \end{pmatrix}^T \approx \begin{pmatrix} \frac{1}{1 - C(n, z^{-1})}x(n) \\ \frac{z^{-1}}{1 - C(n, z^{-1})}x(n) \\ \vdots \\ \frac{z^{-m_d}}{1 - C(n, z^{-1})}x(n) \end{pmatrix}^T \quad (22)$$

$$\frac{\partial x_2(n)}{\partial \boldsymbol{\theta}_c(n)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_2(n)}{\partial c_1(n)} \\ \frac{\partial x_2(n)}{\partial c_2(n)} \\ \vdots \\ \frac{\partial x_2(n)}{\partial c_{m_c}(n)} \end{pmatrix}^T \approx \begin{pmatrix} \frac{z^{-1}}{1 - C(n, z^{-1})}[p(n, z^{-1})x(n)] \\ \frac{z^{-2}}{1 - C(n, z^{-1})}[p(n, z^{-1})x(n)] \\ \vdots \\ \frac{z^{-m_c}}{1 - C(n, z^{-1})}[p(n, z^{-1})x(n)] \end{pmatrix}^T \quad (23)$$

于是,式(17)中 $\frac{dz(n)}{d\boldsymbol{\theta}(n)}$ 的所有组成部分都能方便求得,也就可求解得到 $e(n, \boldsymbol{\theta})$ 的负梯度 $\psi(n)$ 。

2.3 仿真实验

算法的仿真验证选用的 Hammerstein 模型用下式表示:

$$\begin{cases} z(n) = \frac{0.26 + 0.77z^{-1} + 0.77z^{-2} + 0.26z^{-3}}{1 + 0.58z^{-1} + 0.42z^{-2} + 0.06z^{-3}}y_2(n) \\ y_2(n) = 0.02 + y(n) + 0.5y^2(n) + 0.25y^3(n) \end{cases} \quad (24)$$

式中,非线性部分 $y_2(n)$ 存在较小的直流分量,而文献[10]没有涉及该情况。假定以上 Hammerstein 模型的参数已被辨识得到,即 $\hat{\mathbf{h}}(z^{-1}) = \mathbf{h}(z^{-1})$, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_g = \boldsymbol{\theta}_g$ 。仿真输入信号为 $(-1, 1)$ 均匀分布随机数,并经低通滤波,滤波器归一化截止频率为 $\pi/5$, 数据长度为 500 000。根据式(24)中线性部分的阶次,选取 Wiener 预失真器的线性部分中分母和分子的阶次分别为 $m_c = 3, m_d = 3$ 。为达到满意性能,预失真器中非线性部分的阶次一般需要多次仿真实验才能确定,这里该部分对应的阶次 $m_f = 10$ 。

为了验证文中的预失真算法,采用归一化均方失真 E_D 来评估补偿性能,定义为:

$$E_D(n) = 10\lg\left(\frac{\hat{E}\{e^2(n)\}}{\hat{E}\{r^2(n)\}}\right) \quad (25)$$

式中, $\hat{E}\{\cdot\}$ 为 200 个输入采样对应的均方失真的平均值。

预失真器参数矢量的初始参数为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\theta}_f = (1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0)^T \\ \boldsymbol{\theta}_d = (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T \\ \boldsymbol{\theta}_c = (0 \quad 0 \quad 0)^T \end{cases} \quad (26)$$

仿真时,设 $P(0) = I$,未考虑直流分量补偿时,预失真器非线性部分直流分量设为 0。图 6 为三种情况下的归一化均方失真。从图中可以看到,在没有非线性补偿的情况下,由于 Hammerstein 模型的影响,输出采样的均方失真远高于非线性补偿后的情况,而考虑直流分量补偿的情况,其均方失真明显低于未考虑直流分量补偿的情况。此外,如果 Hammerstein 模型非线性部分中的直流分量较大,在未考虑直流分量补偿时,预失真参数将难以收敛得解。

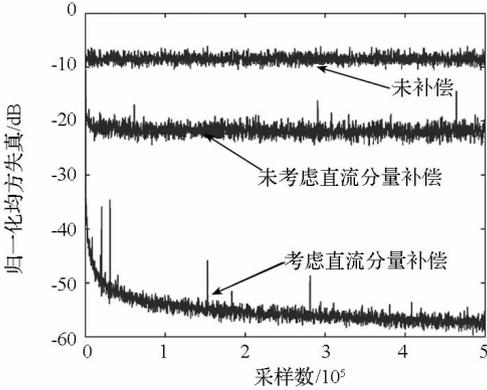


图 6 归一化均方失真的比较

Fig. 6 Normalized mean-square distortion for the different precompensation

3 调制气流声源的非线性补偿实验

根据辨识的 Hammerstein 模型结构,可以设 Wiener 预失真模型中线性部分的分子和分母都为 5 阶。将 Hammerstein 模型的系统参数带入预失真算法中,经多次计算,Wiener 预失真模型中非线性部分为 15 阶多项式时算法的性能趋于稳定。在该预失真模型结构下,NFxPEM 算法执行时归一化均方失真的变化如图 7 所示。在确定预失真模型的参数后,频率为 300Hz 的单频信号经该预失真器作用后的波形如图 8 所示。该预失真波形经过先前得到的 Hammerstein 模型时,输出的时域波形如图 9 中实线所示,而其归一化功率谱如图 10 所示。从图 9、图 10 可以看到,补偿后的模型输出波形接近于理想的单频波形,其输出功率谱中的谐波能量都远低于基频能量。如果通过单频信号辨识得到的 Hammerstein 模型能够充分表征调制气流声源的非线性特性,那么发射图 8 所示的预失真波形后,接收的声波将接近于理想单频信号。而实际上,辨识时使用的单频输入信号并不能充分地激励系统,这直接体现在非线性补偿后声波的功率谱上,如图 11 所示。从图 11 可以看到,300Hz 的基频能量有小幅度的上升,各阶谐频的能量相对于图 2

也有所降低,但降低的幅度并不显著,并且 100Hz 和 200Hz 的分数阶功率谱也有所升高。其中,补偿前后声波在基频和谐频的功率谱变化值如表 1 所示。由实验结果可见,调制气流声源的非线性补偿取得了一定的成效,结果符合降低谐波能量、提高基频能量的设想,说明了本文的研究思路和方法的正确性,但可能是由于单频信号辨识的缺陷,所得 Hammerstein 模型不能充分表征系统特性,致使补偿后的声波依然存在一定程度的谐波畸变。

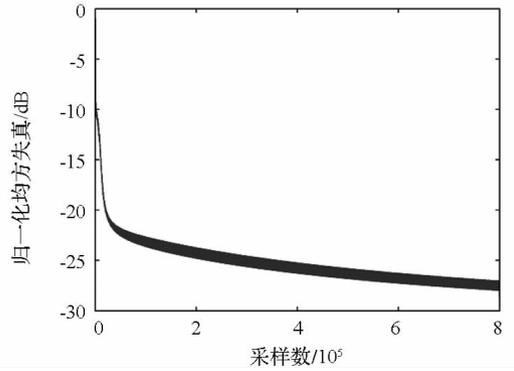


图 7 NFxPEM 算法求解预失真模型参数过程中均方失真的变化

Fig. 7 Normalized mean-square distortion in the computation for obtaining the parameters of predistorter

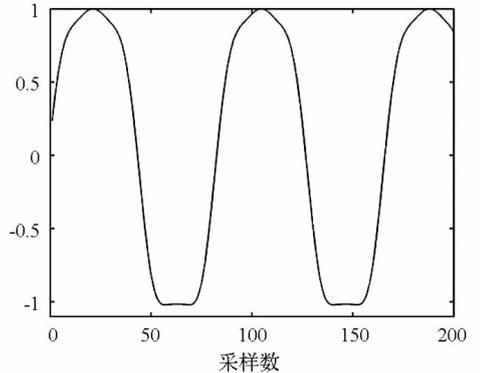


图 8 实验中发射的预失真波形

Fig. 8 Predistorted excitation signal in experiment

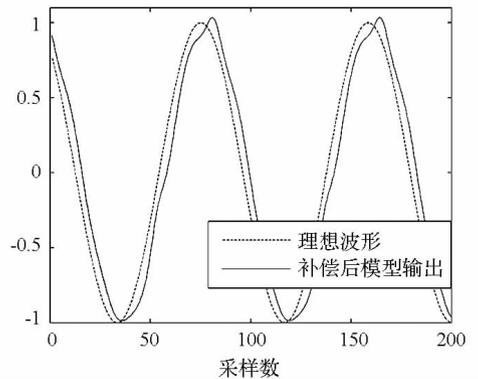


图 9 理想的波形与补偿后模型的输出波形

Fig. 9 Comparison of the sinusoidal signal and the compensated output of the identified system

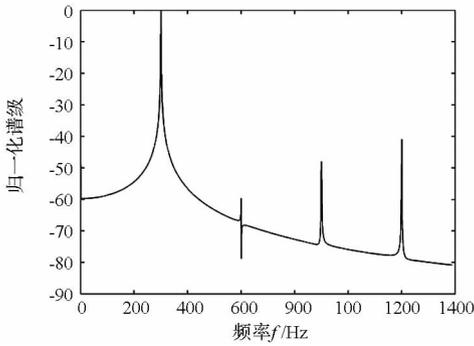


图 10 补偿后模型的输出功率谱

Fig. 10 Power spectrum of the compensated output of the identified system

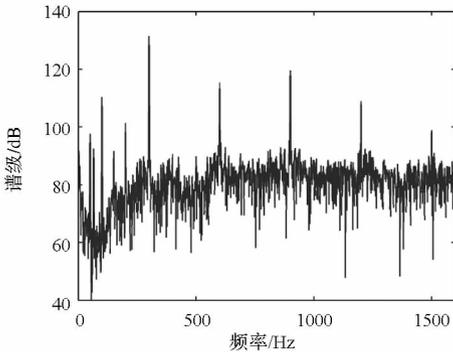


图 11 补偿后调制气流声源的声功率谱

Fig. 11 Power spectrum of the precompensated output of the AMS

表 1 补偿前后声波的基频和谐频功率谱变化

Tab.1 Comparison between the uncompensated and compensated outputs of the AMS in fundamental and harmonic power

频率(Hz)	补偿前(dB)	补偿后(dB)	变化值(dB)
300	130.1	131.4	1.3
600	121.6	115.4	-6.2
900	122.9	119.6	-3.3
1200	113.1	108.9	-4.2

4 结论

在实际测试中,大功率调制气流声源往往存在着较强的谐波畸变。本文将声源系统等效为 Hammerstein 非线性模型,利用该模型下的预失真技术对声源进行了非线性补偿研究。针对辨识所得模型中非线性部分带有直流分量,本文给出了考虑直流分量补偿的预失真算法,并用数值仿真验证了算法的准确性和直流补偿的必要性。在实验中,利用单频信号辨识得到拟合度较好的 Hammerstein 模型;随后,基于该辨识模型和预失真算法得到了预失真波形。实验结果表明,与直接发射相比,补偿发射后声波的功率谱中各阶谐频的能量有所降低,而基频能量有着小幅度的上升。因此,调制气

流声源的非线性补偿取得了一定的成效,也论证了本文研究思路和方法的正确性。然而,目前采用的单频信号辨识 Hammerstein 模型还不能充分表征系统特性,声源在其他形式激励信号下的非线性系统辨识有待进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] Blondel L A, Elliott S J. Electropneumatic transducers as secondary actuators for active noise control [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 219(3): 405-481.
- [2] Glendinning A G, Nelson P A, Elliott S J. Experiments on a compressed air loudspeaker [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, 138(3): 479-491.
- [3] Frederic G P. An experimental and theoretical study of high-intensity, high efficiency sirens [D]. Central County: The Pennsylvania State University, 1987.
- [4] 赵云,曾新吾. 调制气流声源气声转换过程模型研究[J]. *声学学报*, 2011, 36(3): 291-300.
ZHAO Yun, ZENG Xinwu. Numerical model research for the sound energy conversion in air-modulated speaker [J]. *Acta Acustica*, 2011, 36(3): 291-300. (in Chinese)
- [5] 周泽民,曾新吾,龚昌超,等. 大功率调制气流声源阵列的相干合成实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(13): 134305-1-9.
ZHOU Zemin, ZENG Xinwu, GONG Changchao, et al. Experimental investigations on coherent combining of high power and high intensity air-modulated speakers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(13): 134305-1-9. (in Chinese)
- [6] Frank W. An efficient approximation to the quadratic volterra filter and its application in real-time loudspeaker linearization [J]. *Signal Processing*, 1995, 45: 97-113.
- [7] Tsujikawa M, Shiozaki T, Kajikawa Y. Identification and elimination of second order nonlinear distortion of loudspeaker systems using volterra filter [C]//Proceedings of the 2000 IEEE international symposium on circuits and system, 2000: 249-252.
- [8] Schetzen M. The volterra and Wiener theories of non-linear systems[M]. New York: John Wiley&Sons, 1980.
- [9] Vandersteen G, Rolain Y, Schoukens J. Non-parametric estimation of the frequency response functions of the linear blocks of a Wiener-Hammerstein model [J]. *Automatica*, 1997, 33(7): 1351-1355.
- [10] Abd-Elrady E, Gan L, Kubin G. Predistortion of Hammerstein and Wiener systems using the nonlinear filtered-x prediction error method algorithm [J]. *Elektrotechnik& Informationstechnik*, 2010, 127(10): 285-290.
- [11] 许伟,曾新吾,孙海洋,等. 动圈-橡胶结构振动特性的实验研究[J]. *噪声与振动控制*, 2011, 31(3): 15-18.
XU Wei, ZENG Xinwu, SUN Haiyang, et al. Experimental research on the vibration characteristics of moving coil-rubber structure [J]. *Noise and Vibration Control*, 2011, 31(3): 15-18. (in Chinese)
- [12] 马大猷. 调制气流声源的原理[J]. *物理学报*, 1974, 23(1): 17-26.
MA Dayou. The theory of air-modulated speaker [J]. *Acta Physica Sinica*, 1974, 23(1): 17-26. (in Chinese)
- [13] Ljung L. System identification toolbox user's guide [M]. Natick, MA: The MathWorks Inc, 2012.
- [14] Ljung L, Soderstrom T. Theory and practice of recursive identification [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1983.
- [15] Ljung L. Prediction error estimation methods [J]. *Circuits Systems Signal Processing*, 2002, 21(1): 11-21.