

# AES 扬声器实用规范中承受功率试验用 粉红噪声的规定和数字实现

徐小兵, 沈 勇, 邬 宁

(南京大学声学研究所近代声学国家重点实验室, 南京 210093)

摘要: 提出了用数字方法产生 AES 扬声器实用规范中承受功率试验用粉红噪声的方法以及所需的相关技术, 包括数字白噪声序列的产生、粉红噪声滤波器的优化、信号带宽与带外衰减的控制、信号峰值因数的控制等。提出了两种模拟二极管正向导通输入输出特性的数学函数, 进行数字序列峰值因数的控制。利用这些技术进行了实验, 产生了六组不同带宽的 AES 标准粉红噪声信号。实验结果验证了该方法正确可行, 可直接应用到有关 AES 标准的数字化测量之中。

关键词: 粉红噪声; IIR 滤波器; 峰值因数

中图分类号: TN912

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-03-0242-06

## Generation of pink noise defined in the audio engineering society standard

XU Xiao-bing, SHEN Yong, WU Ning

(State Key Laboratory of Modern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Digital techniques are proposed used to develop pink noise for power handling test of AES standard, including development of white noise sequence, optimization of pink noise filter, bandwidth and attenuation control, and peak factor control. Two input-output soft-clip functions that mimic the diode full-wave soft clipping have been designed to control the peak factor of digital sequences. Several AES standard pink noises of different bandwidths are generated. The results show that the method is feasible, and it can easily be applied in the digital testing of AES standard.

Key words: pink noise; IIR filter; peak factor

## 1 引 言

AES 是美国音频工程协会 (Audio Engineering Society) 的简称。AES 于 2003 年最新修订的标准 “AES2-1984 (r2003) Practice Specification of Loudspeaker Components Used in Professional Audio and Sound Reinforcement”<sup>[1]</sup> 制定了专业扩声领域和专业音频领域使用的扬声器单元的实际规范。

“AES2-1984(r2003)” 规定的扬声器功率负荷能力测试信号为: 从厂家标定的低频下限开始的十倍频程带宽的粉红噪声信号, 其通带外的衰减为 12dB/oct, 滤波特性采用巴特沃斯滤波器, 峰值因数为 2<sup>[1]</sup>。

目前 AES 扬声器实用规范中承受功率试验用粉红噪声一般都通过模拟方法来产生, 对信号峰值因数的控制应参照 AES 标准 “AES2-1984(r2003)” 附录 C 推荐的用二极管正向导通限幅电路控制峰值因数的方法<sup>[1]</sup>。这种模拟方法除了具有需要较多的模拟仪器、造价高昂等不足之处, 最大的缺点在于, 控制信号峰值因数必须经过非常仔细地调试, 而且控制的精度不高。随着仪器的老化, 元件参数会发

生变化,因而必须反复重新调试。

本文用数字方法来产生 AES 承受功率试验用粉红噪声。用数字滤波器实现对信号频带宽度和带外衰减特性的控制。通过构造数学函数来对数字序列进行处理,控制数字序列的峰值因数,从而控制数字序列 D/A 之后获得的模拟信号的峰值因数。实验结果证明可以将信号的峰值因数控制在  $2 \pm 0.0001$ , 很好地解决了峰值因数控制的难题。

## 2 数字方法的基本原理

AES 标准粉红噪声对频带宽度、带外衰减和峰值因数有特定的要求原理图。如图 1 所示,首先将高斯分布的白噪声序列通过数字粉红噪声滤波器产生粉红噪声序列,再将其通过数字带通巴特沃斯滤波器,最后进行峰值因数的控制,并进行 D/A 转换就得到了完全符合 AES 标准的测试信号。本文提出了数字粉红噪声滤波器的设计方法、数字带通滤波器的设计方法和数字信号峰值因数的控制方法;并将所有相关技术进行实际应用,实验产生了六组不

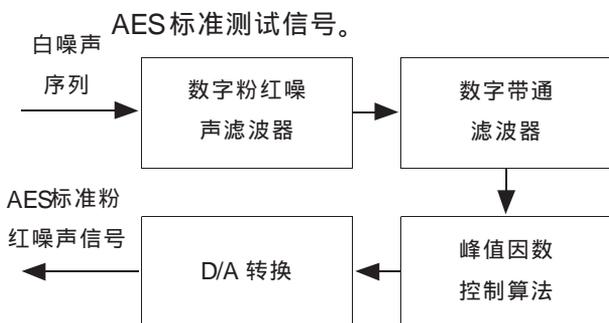


图 1 用数字方法产生 AES 扬声器实用规范中承受功率试验用粉红噪声原理框图

Fig.1 Block diagram of digital method to develop the pink noise for power handling test of AES standard

### 2.1 数字白噪声序列和粉红噪声序列

白噪声是一种广义平稳随机噪声,在线性频率坐标下其功率谱密度为常数,在对数频率坐标下,其功率谱密度以  $3\text{dB/oct}$  的斜率上升。数字白噪声序列可以通过先产生  $0\sim 1$  之间均匀分布的随机数,再获得高斯分布的白噪声序列。设  $m=2^{16}$ ,  $m$  为 16 位二进制数的最大值,则  $0\sim 1$  之间均匀分布的随机序列表达式为:

$$r_i = \text{mod}(2053r_{i-1} + 13849), i=1, 2, 3, \dots$$

$$\text{rnd}_i = r_i / m \quad (1)$$

其中  $r_i$  为随机数种子,其初值  $r_0$  可以取小于  $m$  的任意自然数,  $\text{rnd}_i$  为第  $i$  个随机数,  $\text{mod}$  为取整函数,则产生均值为 0, 方差为  $\sigma$  的高斯分布白噪声序列其表达式为:

$$y = \sigma \frac{\sum_{i=1}^n \text{rnd}_i - n/2}{\sqrt{n/12}} \quad (2)$$

其中  $n$  为足够大的整数,通常取  $n=12$  时,已有相当好的近似程度<sup>[2]</sup>。

当需要产生序列长度为  $N$  的高斯分布白噪声序列时,必须先根据式(1)产生  $N \times n$  个  $0\sim 1$  之间均匀分布的随机数  $\text{rnd}_i (i=1, 2, \dots, N \times n)$ , 然后根据式(2), 由每  $n$  个  $0\sim 1$  之间均匀分布的随机数可得到一个高斯分布的随机数,这样由  $N \times n$  个  $0\sim 1$  之间均匀分布的随机数就可以获得  $N$  个高斯分布的随机数。对均值为 0 的序列,其有效值仅与  $\sigma$  有关,两者数值相差不大,因此  $\sigma$  取值为希望白噪声序列具有的有效值即可。实际实验时作者希望获得均值为 10000 的白噪声序列,因此取  $\sigma=10000$ , 而实际产生的白噪声序列的有效值为 10001.5(随机数种子初值  $r_0$  取 52428,  $n=12, N=65536$ )。

粉红噪声定义为用正比于频率的频带带宽测量时,频谱连续且均匀的信号。在线性频率坐标下,其功率谱密度以  $-3\text{dB/oct}$  的斜率下降。粉红噪声一般采用将白噪声通过滤波器的方法产生,该滤波器称为粉红噪声滤波器。其传递函数为:

$$\hat{H}(s) = \frac{k}{\sqrt{s}} \quad (3)$$

$$\hat{H}(j\omega) = \frac{k}{\sqrt{j\omega}} = \frac{k}{\sqrt{\omega}} e^{j(\pi/4)} \quad (4)$$

$k$  为常数,方程(1)、(2)是理想的粉红噪声滤波器的传递函数,具有  $-3\text{dB/oct}$  的斜率。粉红噪声滤波器的设计,可用遗传算法进行优化以获得尽可能逼近理想传递函数的滤波器<sup>[3,4]</sup>。

遗传算法是一种基于自然选择和自然遗传学机理进行全局搜索的优化算法,在电路的优化方面有广泛的应用<sup>[5,6]</sup>。由于直接用一个高阶带通滤波器来优化时,一次优化的参数较多收敛结果不太理想,因此考虑用两个较低阶滤波器级联,采用遗传算法来分别优化  $3\text{dB/oct}$  曲线的一段。原理如图 2 所示。

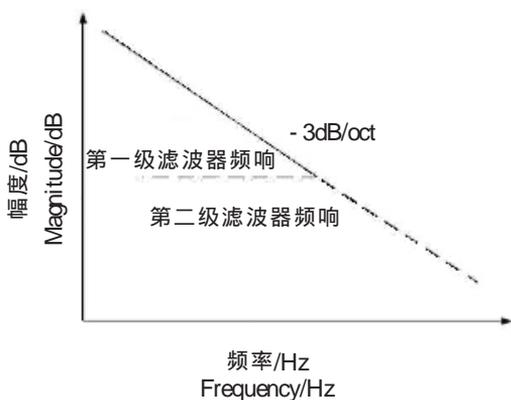


图2 两级滤波器级联时各自的理想频响曲线  
Fig.2 Frequency response of two filters in series

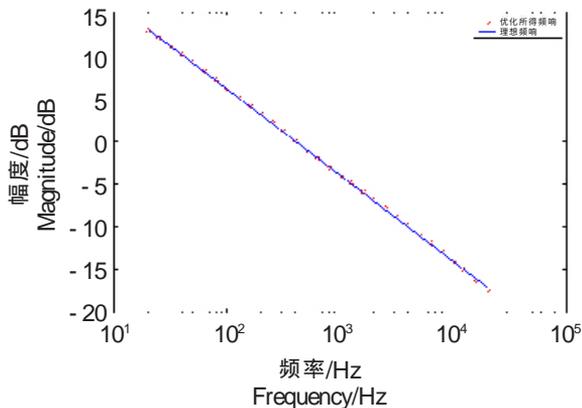


图3 优化所得滤波器频响与理想频响比较  
Fig.3 Comparison of the frequency response of the optimized filter and the ideal one

由图2可知,只要适当选取两个滤波器增益的差以及两个滤波器中心频率的比值,级联之后的滤波器频响就可以很好地逼近-3dB/oct。实际优化时,将H(s)表示为两个增益相差20dB,中心频率之比为100的3阶低通滤波器的级联:

$$H(s) = H_1(s) H_2(s) \quad (5)$$

$$H_1(s) = 2 \frac{0.1s/\omega_c + 1}{s/\omega_c + 1} \left[ 1 + G \frac{(s/\omega_c)^2 - 2ks/\omega_c + 1}{(s/\omega_c)^2 + 2ks/\omega_c + 1} \right] \quad (6)$$

$$H_2(s) = \frac{2}{s/(100\omega_c) + 1} \cdot \left[ 1 + G \frac{(s/(100\omega_c))^2 - 2ks/(100\omega_c) + 1}{(s/(100\omega_c))^2 + 2ks/(100\omega_c) + 1} \right] \quad (7)$$

$\omega_c$ 为第一级滤波器的中心频率,G为加权系数,K为阻尼因数,

只须优化上述三个参数,使H(s)逼近理想滤波器的传递函数 $\hat{H}(s)$ 。因此可建立如下目标函数:

$$E = \sum_{i=1}^M [ |H(s_i)| - |\hat{H}(s_i)| ]^2 \quad (8)$$

$s_i = j\omega_i$ ,  $\omega_i$ 为音频范围(20Hz-20kHz)内的所有1/3倍频程频率点。

实际优化的结果: $\omega_c = 2\pi f_c = 120\pi$ ,  $G = 0.275$ ,  $k = 2.22$  传递函数分别为:

$$H_1(s) = 2 \frac{0.1s/(120\pi) + 1}{s/(120\pi) + 1} \cdot \left[ 1 + 0.275 \frac{(s/(120\pi))^2 - 4.44s/(120\pi) + 1}{(s/(120\pi))^2 + 4.44s/(120\pi) + 1} \right] \quad (9)$$

$$H_2(s) = \frac{2}{s/(12000\pi) + 1} \cdot \left[ 1 + 0.275 \frac{(s/(12000\pi))^2 - 4.44s/(12000\pi) + 1}{(s/(12000\pi))^2 + 4.44s/(12000\pi) + 1} \right] \quad (10)$$

根据式(7)、(8),将模拟滤波器的传递函数进

行数字化就得到数字粉红滤波器的传递函数<sup>[7]</sup>。优化所得数字粉红噪声滤波器的频响如图3,将白噪声序列通过该数字粉红噪声滤波器就得到粉红噪声序列。

### 2.2 数字带通滤波器

由通带外的衰减为12dB/oct可确定带通滤波器的阶数为4,通过一个截止频率为 $\omega_L = 2\pi f_L$ 的2阶模拟高通滤波器H(j $\omega_L$ )与一个截止频率为 $\omega_H = 10\omega_L$ 的2阶模拟低通滤波器H(j $\omega_H$ )级联获得需要的模拟带通滤波器H(j $\omega$ ),即:

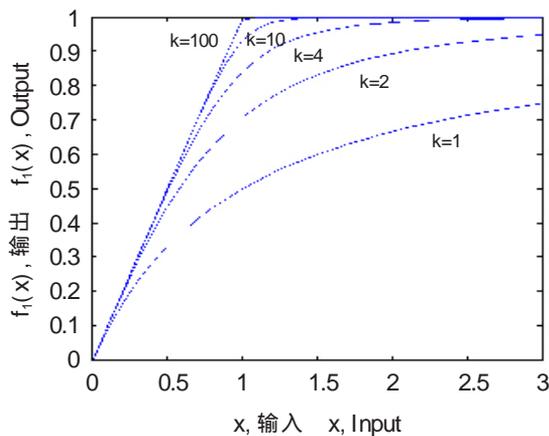
$$H(j\omega) = H(j\omega_L) H(j\omega_H) \quad (11)$$

而模拟低通滤波器和模拟高通滤波器可以通过对巴特沃斯滤波器原型进行相应的变换得到。将获得的模拟带通滤波器数字化即可获得所需的数字带通滤波器。

### 2.3 峰值因数控制

峰值因数的定义为在观测时间内信号的瞬时极大值与其有效值之比。用数字方法控制信号峰值因数就必须构造数学函数来模拟二极管正向导通限幅电路的软削波特<sup>[8]</sup>。用数学函数对数字序列进行处理,控制数字序列的峰值因数,从而控制了数字序列D/A之后获得的模拟信号的峰值因数。本文提出了两个数学函数,实验证明在保证不改变信号频谱特性前提下,可以很好的控制信号的峰值因数。两种函数如式(12)、(13):

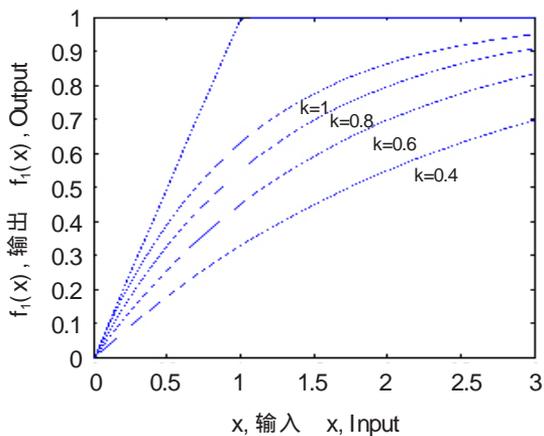
$$f_1(x) = \begin{cases} \left( \frac{x^k}{x^k + 1} \right)^{1/k} & x \geq 0 \\ - \left( \frac{(-x)^k}{(-x)^k + 1} \right)^{1/k} & x < 0 \end{cases} \quad (12)$$



(a)

(a) 函数  $f_1(x)$  在第一象限的曲线

(a) Function Curve of  $f_1(x)$  in the first quadrant



(b)

(b) 函数  $f_2(x)$  在第一象限的曲线

(b) Function Curve of  $f_2(x)$  in the first quadrant

图 4 两种数学函数对应不同削波参数  $k$  时的函数曲线

Fig.4 Curves of two functions with different clip factors

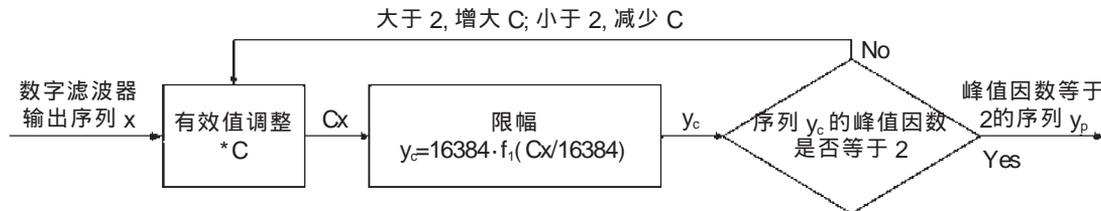


图 5 控制数字序列峰值因数的流程图

Fig.5 Flow chart of the peak factor controlling of the digital sequences

$$f_2(x) = \begin{cases} 1 - e^{-kx} & x \geq 0 \\ e^{-kx} - 1 & x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$x$  为输入,  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  为输出,  $k$  为削波参数 ( $k > 0$ )

对不同的削波参数  $k$ , 函数具有不同的限幅特性,  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  在第一象限的曲线随  $k$  值的变化如图 4 所示。

由图 4 可见函数  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$  具有不同的限幅特性, 而且改变  $k$  值可以改变其限幅特性, 因而可以适应不同场合的需要。实际实验时, 为了控制粉红噪声的峰值因数, 选用了函数  $f_1(x)$ ,  $k$  值取 4, 实验结果证明其限幅特性完全满足要求。

实际使用数学函数控制峰值因数时还必须先设定输出的最大值  $y_{\max}$ ,  $y_{\max}$  可根据所使用的 D/A 器件的位数来决定, 通常留有一定的余量。实际实验时将  $y_{\max}$  设为  $2^{14}=16384$ , 控制峰值因数的过程如图 5 所示。

### 3 实验验证

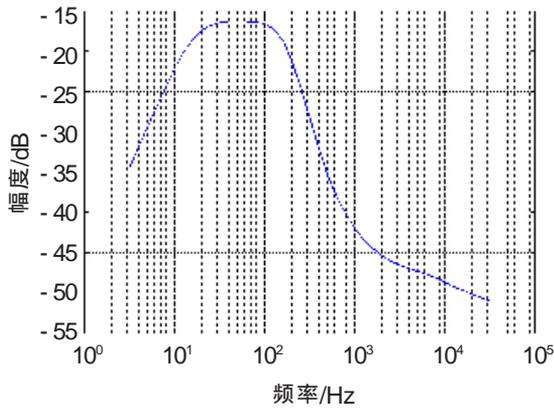
实验共生成了 6 组不同带宽的 AES 标准测试信

号, 实验平台为计算机与 24 位专业音频卡, 所有数值运算均基于计算机完成。将经过峰值因数控制之后的噪声信号序列保存为计算机波形文件 (.WAV), 经专业音频卡播放就能获得需要的测试信号。用 B&K 2012 测量六组信号的 1/3oct 频谱, 平均次数 32 次, 参照文献[1]附录 C(2)用 B&K 2610 测量信号的有效值, 用示波器观察信号的峰值, 从而获得信号的峰值因数。

实际测量结果如图 6(a)~6(f) 所示, 图 6 的实验结果证明用本文提出的方法获得的测试信号的频谱、带外衰减特性以及峰值均完全符合 AES 标准的规定。

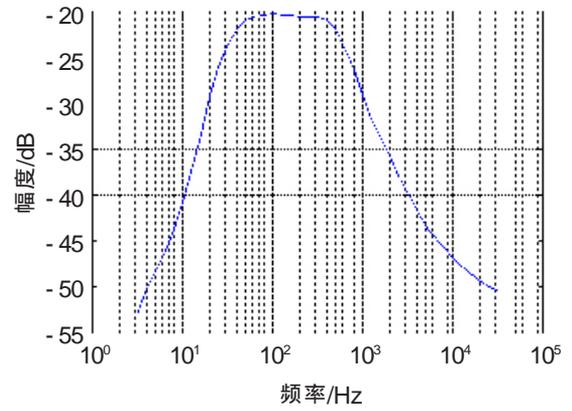
### 4 结论

本文提出了用数字方法产生 AES 扬声器实用规范中承受功率试验用粉红噪声的技术, 实验表明该方法正确可行。且提出的控制峰值因数的方法可以十分精确地控制信号的峰值因数, 很好地解决了



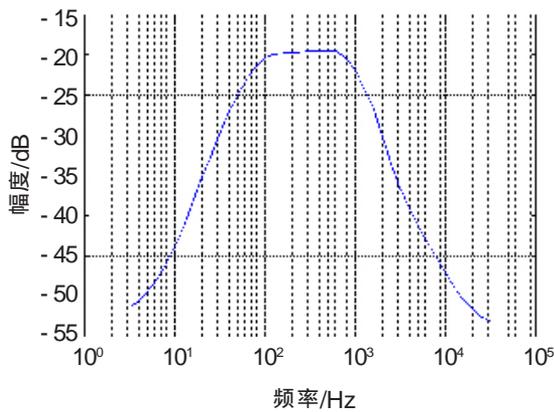
(a) 带宽 20Hz~200Hz, 峰值因数 2

(a) bandwidth: 20Hz~200Hz, peak factor:2



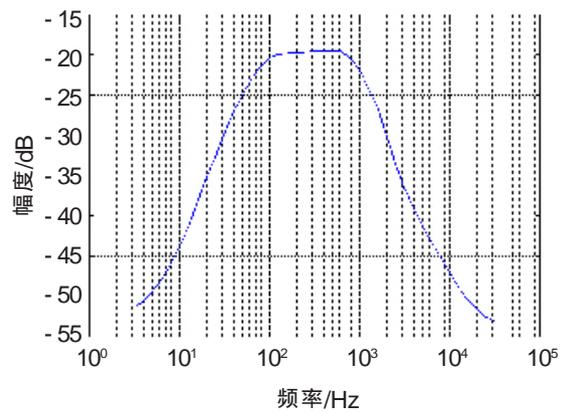
(b) 带宽 50Hz~500Hz, 峰值因数 2

(b) bandwidth: 50Hz~500Hz, peak factor:2



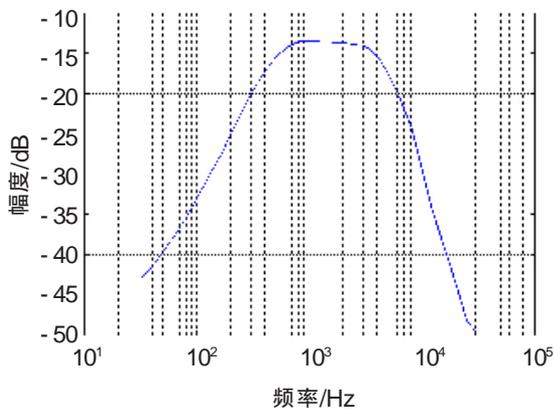
(c) 带宽 100Hz~1000Hz, 峰值因数 2

(c) bandwidth: 100Hz~1000Hz, peak factor:2



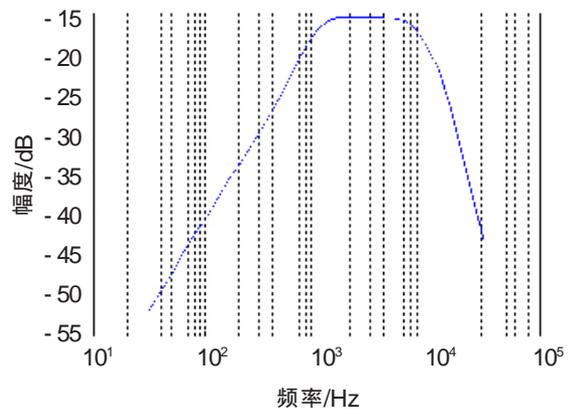
(d) 带宽 200Hz~2000Hz, 峰值因数 2

(d) bandwidth: 200Hz~2000Hz, peak factor:2



(e) 带宽 500Hz~5000Hz, 峰值因数 2

(e) bandwidth: 500Hz~5000Hz, peak factor:2



(f) 带宽 1000Hz~10000Hz, 峰值因数 2

(f) bandwidth: 1000Hz~10000Hz, peak factor:2

图 6 六种不同带宽的 AES 标准承受功率试验用粉红噪声的 1/3oct 频谱及峰值因数

Fig.6 1/3oct spectrums and peak factors of six different bandwidth power handling test signals of AES standard

传统的模拟方法控制峰值因数的难题,并可以用于对其他行业标准的测试信号进行峰值因数的控制。另外提出的相关数字技术可直接应用到有关虚拟仪器及其他数字化测量仪器之中,进行有关 AES 标准的测试。

## 参 考 文 献

- [1] "AES Recommended Practice Specification of Loudspeaker Components Used in professional Audio and Sound Reinforcement" [S]. AES2-1984 (r2003).

- [2] 徐士良. c 常用算法程序集[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.  
XU Shiliang. Common used arithmetic program in c [M]. Beijing Publishing company of tsinghua University, 1996.
- [3] Keele D B. The design and use of a simple pseudo random pink-noise generator[J]. J A E S, 1973, 21(1): 33-41.
- [4] Lee Powell. Systematic design of accurate pink noise filters[J]. J A E S 1981, Preprint 1777; Convention 69th; April.
- [5] 陈国良, 王熙法. 遗传算法及其应用[M]. 北京: 邮电出版社, 1996, 1-3.  
CHEN Guoliang, WANG Xifa. Genetic arithmetic and it s application[M]. Beijing: Publishing company of Post and Telegraph. 1996, 1-3.
- [6] 鲍顺光. 优化方法与电路优化设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000.  
BAO Shunguang, Optimizing method and the circuit optimizing and design[M]. Nanjing: Publish Company of Southeast University, 2000.
- [7] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995, 154-170.  
CHENG Peiqing. Tutorial of digital signal processing [M]. Beijing: Publishing company of tsinghua University, 1995, 154-170.
- [8] Keele D B. Development of test signals for the EIA-426-B loudspeaker power rating compact disk[J]. J A E S, Preprint5451; Convention 111th; September 2001.