Audio Quality Measuring Device Based on STM32*

DIAO Chuhan, WANG Yan*, CHEN Minjie, FU Shanfeng, LIN Shule
(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: To evaluate the total harmonic distortion (THD), frequency response range and other parameters of audio equipment, an audio quality measuring device is designed based on the STM32F407VET6 single-chip microcomputer. Powered by a lithium battery with a Buck circuit, the device uses the audio pickup circuit to complete the signal acquisition. With he external 16-bit A/D module for signal ADC sampling, the fundamental voltage amplitude and four harmonic amplitudes are obtained by using FFT algorithm. Accordingly the frequency response ranges of the equipment are obtained, which can be displayed on the screen ultimately. The results show that the device has high testing accuracy and reliability. Through comparing the testing data of the device with the data provided by the audio manufactures, it is found that both the THD and frequency response ranges have small errors. The device can meet the practical requirements of use.

Key words: STM32 single-chip microcomputer; audio quality test; FFT algorithm; total harmonic distortion; frequency response range
EEACC: 2250 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2024.04.010

基于 STM32 单片机的音响品质测试仪*

刁楚涵, 王 艳*, 陈敏杰, 付山峰, 林书乐
(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030000)

摘 要: 基于 STM32F407VET6 单片机, 设计出一款能够测试音响设备失真度、频响范围等参数的音响品质测试仪。该装置采用锂电池, 配合降压电路进行供电, 利用拾音电路采集声音信号, 借助外置 16 位 A/D 模块进行信号的 ADC 采样, 通过 FFT 算法对声音信号进行分析, 得到基波电压幅值和四次谐波幅值, 计算出音响设备的失真度, 进而得到音响设备的频响范围, 最终将结果显示在屏幕上。该装置填补了市面上音响品质测试系统的空白, 具有较好的测试精度和可靠度, 且结构紧凑, 显示直观, 使用简单, 能够满足实际使用需求。

关键词: STM32 单片机; 音响品质测试; FFT 算法; 失真度; 频响范围
中图分类号: TN709 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2024)04-0935-06

频响范围和失真度是衡量音响设备品质的重要指标。音响的频响范围是指该音响在音频信号重放时, 在额定功率状态下并在指定的幅度变化范围内音响所能重放音频信号的频响宽度。通俗地说, 就是音响所能发出的最低音和最高音之间的范围[1], 通常以赫兹(Hz)为单位表示。频率响应曲线显示了音响设备在不同频率下的输出级别。理想情况下, 一个音响设备应该在整个频率范围内提供相对平坦的频率响应, 也就是说, 在所有频率下输出的声音应该保持相对均衡, 没有明显的增强或削弱。音响设备的频响范围越宽, 意味着它能够处理更低和更高的音频频率。音响的失真度是指音响设备在信号传输过程中引入的音频失真的程度。失真是指原始音频信号与经过音响设备处理后的输出信号之间的差异或变形, 失真度表示一个信号偏离正弦信号的程度[2]。较低的失真度表示设备能够更准确地再现原始音频信号, 提供更高的音质和更真实的听觉体验。本文测试的频响范围具体指的是失真度小于 1%频响范围。

目前市面上缺少一款能够专用于测试音响的频响范围和失真度等参数的装置或系统, 已有的一些音频分析仪不能直观地得到关于音响设备的参数, 且价格昂贵, 使用复杂。

本文基于 STM32F407VET6 单片机, 借助其集成的 FPU 单元和 DSP 指令集, 采用基 4 FFT 算法, 为音响设备的频响范围和失真度分析提供了一种可靠的解决方案。该方案具有检测精度和可靠度高、硬件结构简单、结果显示直观、耗时少等优点。

1 基本原理

失真度定义为除基波分量以外的所有谐波分量之和的平方根与基波分量之比[3], 一般指的是总谐

项目来源: 国家自然科学基金项目(11705108)
收稿日期: 2023-11-27 **修改日期**: 2024-02-01

波失真(Total Harmonic Distortion,THD)。目前,测量失真度的仪器根据测量原理大致可分为基波剔除法和频谱分析法[4]。基波剔除法指的是通过如文氏电桥、谐振电桥等具有频率选择性的无源网络抑制基波,借助总的电压有效值和抑制基波后的谐波电压的有效值计算出失真度。频谱分析法指的是通过测量各次谐波的电压幅值的方法计算出波形的失真度。根据这两类测量原理,失真度的测试方法一般分为模拟法和数字化方法。基于模拟法的失真度测量仪由于有源元件的非线性,因此会在输入级、桥前放大器等部分产生机内引入失真[5],该失真对于较小失真度的测量有较大的影响。基于 DFT 的频域分析法可同时得到正弦信号的失真度及其频谱,且测量误差小,同时可借助快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT)显著降低计算量,因此亦称作 FFT 法。本系统采用的就是 FFT 法。

1.1 失真度的测量

总谐波失真定义为信号中全部谐波分量的能量与基波能量之比的平方根值,即:

$$\mathrm{THD}=\frac{\sqrt{U_{o2}^2+U_{o3}^2+\cdots+U_{o,n}^2}}{U_{o1}} \tag{1}$$

式中:THD 为失真度;U_{o1} 为基波电压的有效值;$U_{o2}\sim U_{o,n}$ 为谐波电压的有效值。因此要计算 n 次谐波的失真度,只需要求出各次谐波的幅值即可。

1.2 基 4 FFT 算法基本原理

快速傅里叶变换(FFT)是信号处理领域最重要的算法之一,它可对时间序列的频率内容进行高效计算估计[6],信号的时频域转换、信号与特征卷积、信道化等都需要 FFT 算法[7]。FFT 算法的基本思想如下:利用旋转因子 W_N^{kn} 的 3 个特性,即周期性、对称性和可约性[8],把长度为 $N=4^t$ 的序列一分为四,将 N 点 DFT 表示为 4 个 $N/4$ 点 DFT 的线性组合。然后再把 $N/4$ 点 DFT 一分为四,表示为四个 $N/16$ 点的 DFT,如此重复下去,直至分解成两点 DFT 的运算。

设 $p=4$,$q=N/4=4^{t-1}$,输入序列 $x(n)$ 由多基时分蝶式运算定理可以分解成如下的 4 个子序列:

$$x_m(4i+m)\ (m=0,1,2,3;0\leqslant i\leqslant\frac{N}{4}-1,i\text{ 为整数}) \tag{2}$$

子序列 $x_m(i)$ 均为 $N/4$ 点序列,设它们的 $N/4$ 点 DFT 为 $X_m(r)$,则可得:

$$X(k)\mid_{k=s\frac{N}{4}r}=X\left(s\frac{N}{4}+r\right)=\sum_{m=0}^{3}W_N^{m\left(s\frac{N}{4}+r\right)}X_m(r)$$

$$(0\leqslant k\leqslant N-1,0\leqslant s\leqslant 3,0\leqslant r\leqslant\frac{N}{4}-1,k,s,r\text{ 均为整数}) \tag{3}$$

将 $s=1,2,3,4$ 代入上式,则:

$$X(r)=X_0(r)+W_N^rX_1(r)+W_N^{2r}X_2(r)+W_N^{3r}X_3(r) \tag{4}$$

$$X\left(r+\frac{N}{4}\right)=X_0(r)+W_N^{\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_1(r)+W_N^{2\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_2(r)+W_N^{3\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_3(r) \tag{5}$$

$$X\left(r+\frac{2N}{4}\right)=X_0(r)+W_N^{\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_1(r)+W_N^{2\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_2(r)+W_N^{3\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_3(r) \tag{6}$$

$$X\left(r+\frac{3N}{4}\right)=X_0(r)+W_N^{\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_1(r)+W_N^{2\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_2(r)+W_N^{3\left(r+\frac{N}{2}\right)}X_3(r)\ (0\leqslant r\leqslant\frac{N}{4}-1,r\text{ 为整数}) \tag{7}$$

已有结果表明,当 FFT 的基大于 4 时,不会明显降低计算量,即基 8 FFT 或基 16 FFT 等 FFT 算法的运算效率与基 4 FFT 算法很接近。综合考虑,基 4 FFT 算法是最恰当的 FFT 算法。在本系统中,采用的是 4 096 点的 FFT。

2 系统硬件设计

2.1 硬件系统框图

系统硬件框图如图 1 所示,本硬件系统由声音提取模块、电压采集模块、MCU、显示模块及供电模块构成。声音提取模块将被测声音信号转换为电信号,并进行放大和抬升,选择的芯片是 NE5532;电压采集模块将模拟电信号转换为数字电信号,选择的芯片是 AD7683,这是一种低功耗高精度 16 位高速串行 A/D 转换器[9],基准电压由外部提供;MCU 对数字电信号进行 FFT 处理和分析,主控芯片为 STM32F407VET6;显示模块用来显示所测得的频响范围和失真度数据,主要由串口屏实现;供电模块用于给其他模块供电,选择的电压转换芯片为 TPS5430。

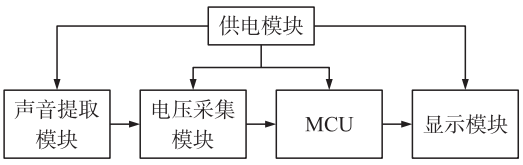


图 1 硬件系统框图

2.2 拾音电路设计

本系统进行测试时,被测声音信号的最高频率 $f_{\max}=22$ kHz,该声音信号在一定响度下转换得到的电信号电压峰峰值 $V_{p-p}\approx 20$ mV。由于本系统采用单电源供电,故无法放大负电压,因此需要对交流信号进行抬升。考虑到 AD7683 外部基准电压为 3 V,为留有一定裕量,故选择放大倍数 $A_u=100$,直流偏

置电压 $U_{dc}=1.5$ V，此时得到电信号电压峰峰值 $V'_{p-p}=2$ V，电信号电压范围为 0.5 V~2.5 V。由以上数据计算可得带宽增益积（Gain-Bandwidth Product，GBW）为 2.2 MHz，最大压摆率（Slew Rate，SR）为 0.9 mV/μs。同时，在对信号进行放大时，只需要放大交流成分，不需要放大直流成分。综上所述，需要搭建一个最高可对 22 kHz、20 mV 的电信号放大 100 倍，可提供 1.5 V 直流偏置的单电源供电的交流信号放大电路。

NE5532 是一种高性能低噪声双运算放大器集成电路[10]，其带宽增益积典型值为 10 MHz，压摆率典型值为 9 V/μs，完美满足本系统对带宽增益积和压摆率的要求，故选择该芯片作为集成运放芯片。为了验证本理论方案的可行性，所以对电路进行仿真，仿真电路如图 2 所示，得到的波形如图 3 所示。

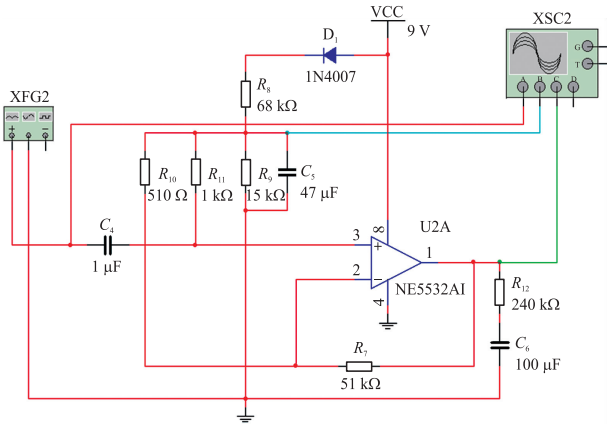


图 2　交流信号放大电路仿真电路图

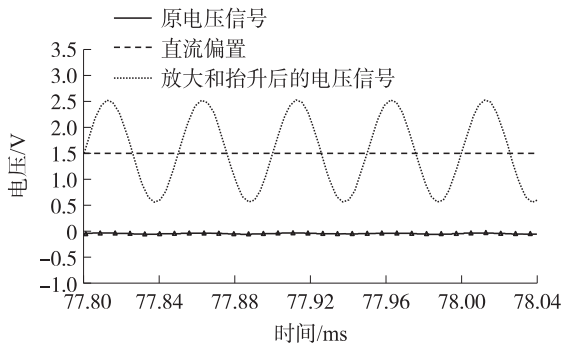


图 3　交流信号放大电路仿真波形图

电路如图 4 所示，U6.2 与 R_6、R_{28}、R_{18}、C_{21} 构成同相交流信号放大电路，放大倍数可由下式计算得到：

$$A_u=1+\frac{R_{28}}{R_6} \tag{8}$$

在实际使用时，取 $R_{28}\approx51$ kΩ，即 $A_u\approx100$。R_{11} 与 R_{12} 构成的分压电路用来给纯交流电信号提供直流偏置，根据两者取值可得直流偏置电压 $U_{dc}\approx1.5$ V。C_{21} 使得交流信号形成反馈通路，直流信号无法形成直流通路，故可保证只放大交流成分，不放大直流成分。U6.1 构成电压跟随器，主要起到隔离作用，同时增强电路的带负载能力。

在其他电路方面，D_1 的作用是防反接，用来保护电路；C_{14} 主要用来滤除电源纹波；R_{15}、C_{19}、R_{14}、C_{20} 构成二阶低通滤波器，根据：

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{R_{14}R_{15}C_{19}C_{20}}} \tag{9}$$

可得其截止频率 $f\approx0.5$ Hz，同样用来滤除电源纹波。R_{13} 与拾音器分压，确保拾音器上的电压在拾音器的工作电压范围之内。实物电路如图 5 所示，拾音电路实测波形如图 6 所示：上方波形为原信号波形，下方波形为经过放大和抬升后的电压波形。

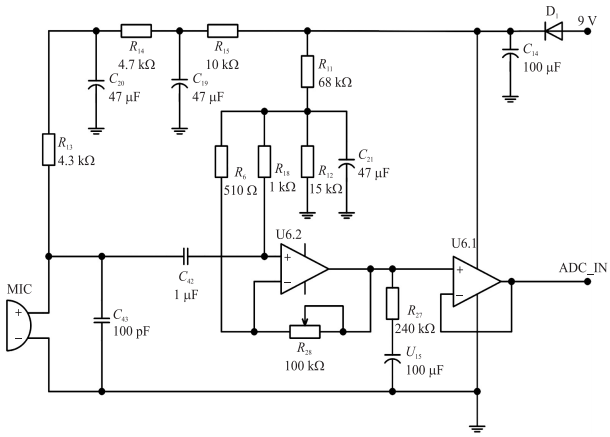


图 4　交流信号放大电路

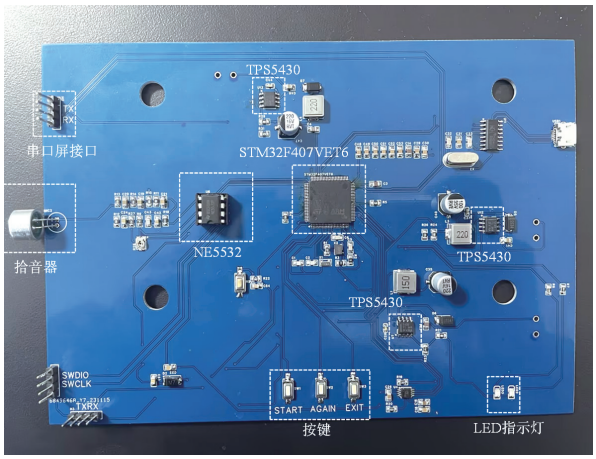


图 5　实物电路图

3　系统软件设计

3.1　系统主流程设计

该系统上电后会进入初始页面，同时红色 LED 灯以 500 ms 的速度闪烁，表明系统目前处于待机状态，初始页面提示用户按下“STRAT”按键进入测试模式。当音响开始播放声音，同时按下系统上的

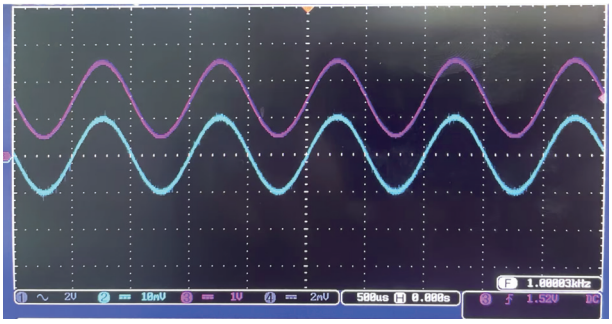


图 6 拾音电路实测波形图

START 按键,绿色 LED 灯会以 100 ms 的速度闪烁,系统进入测试模式。MCU 的 ADC 初始设置为 100 kHz 的采样率,当采集到第一个声音信号后,会根据此声音的频率自动切换 ADC 采样率以提高测量精度。一次 ADC 采样结束后,通过 FFT 算法得到各频率上的电压值,取其中基波电压值和四次谐波分量的电压值作为计算失真度的数据。当前一段音频测试完成之后,绿色 LED 灯熄灭,红色 LED 灯重新以 500 ms 的速度闪烁,同时会在屏幕上显示该音响设备的对应失真度的值和频响范围。系统软件总体流程如图 7 所示。

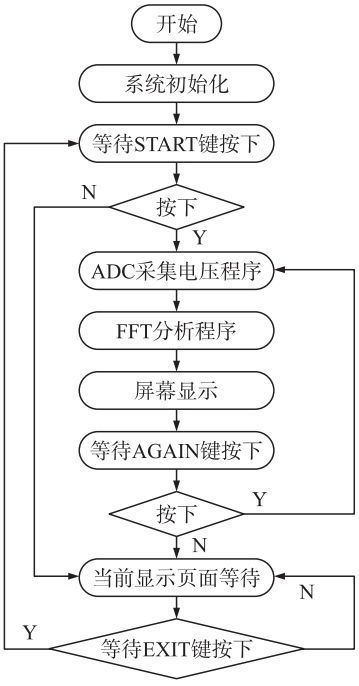


图 7 系统软件总体流程图

3.2 FFT 算法设计

FFT 算法的缺点是频谱泄露和栅栏效应。频谱泄露指的是做 FFT 运算时,测量间隔为被测信号周期的非整数倍,就会出现信号的不连续性,并在频域中有所体现。由于频谱泄露效应,FFT 无法保证谱峰信息恢复的精度[11]。解决该问题的方法是选用合适的窗函数来截断原函数。单一正弦信号与窗函数相乘,正弦信号在频域就是一个冲激,冲激和窗函数频域响应卷积之后就得到了和窗函数频域响应形状类似的频域分布,传统的窗函数包括海明窗、汉宁窗、布莱克曼窗等。布莱克曼窗与海明窗、汉宁窗相同,都是属于余弦窗,但是布莱克曼窗增加了二次谐波分量[12],该窗函数能够减小谐波分量对信号参数测量的影响,且能够提高谐波检测的准确性。本系统中选择对 FFT 加布莱克曼窗,将加窗前后的实验效果进行对比,发现对频谱泄露有一定的改善。

栅栏效应指的是在对模拟信号的采样过程中,由于采样频率或者截断长度选择不当使得频域中任何一个离散频率都与被分析的周期信号频率不等,即被分析信号落在两个离散频率(两根谱线)之间[13],这两根谱线如栅栏一样,挡住了应该有的频率。该效应会影响频率和电压幅值的测量。为了减小该效应的影响,本系统首先对不同频率的信号选择不同的采样频率,使得采样频率与被测信号频率相差不会太大,从而提高对频率测量的精度。具体的选择是:当信号频率 $f \leqslant 1$ kHz 时,五次谐波分量频率最高为 5 kHz,故设置采样频率为 12 kHz,此时分辨率为 2.9 Hz;当 1 kHz$<f\leqslant$22 kHz 时,五次谐波分量频率最高为 110 kHz,故设置采样频率为 240 kHz,此时分辨率为 58.6 Hz。经实际实验测试,在该采样频率和分辨率下,能够满足测试的精度和准确度。另一方面,为了得到更准确的电压值,本系统除了对各采样点上的电压值进行取样,还对该采样点向上和向下分别十个点的电压值进行了取样,最终该采样点上的电压幅值为:

$$U=\sqrt{U_{n-10}^2+U_{n-9}^2+\cdots+U_{n-1}^2+U_n^2+U_{n+1}^2+U_{n+2}^2+\cdots+U_{n+10}^2} \tag{10}$$

式中:U 为该采样点上的最终电压幅值,U_n 为得到的该采样点上的初始电压,$U_{n\pm i}(i=1,2,3,\cdots,10)$ 为该采样点向上和向下各十个点的电压幅值。以被测信号频率为 500 Hz 为例,根据公式:

$$\text{数组下标}=\frac{\text{信号频率}\times\text{FFT 计算点数}}{\text{采样频率}} \tag{11}$$

可以得到,500 Hz 对应的电压值在 ADC 采样原始数据的数组中下标为 171,则实际计算该基波对应的电压值时,取的是数组下标从 161 到 181 的点。同时基波电压值不会受到谐波分量的影响:当基频为 500 Hz 时,二次谐波频率为 1 kHz,对应的数组下标为 341,并不在 161 到 181 的取值范围内,故保证了基波电压值的准确性。FFT 算法流程如图 8 所示。

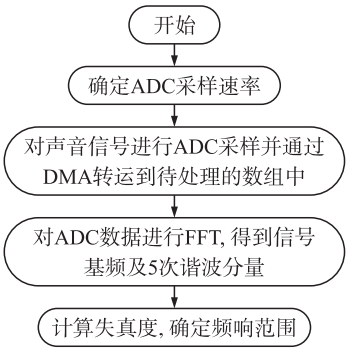


图 8　FFT 算法流程图

4　系统测试结果

经过上述系统硬件和软件设计，得到图 9 所示的最终测试效果。

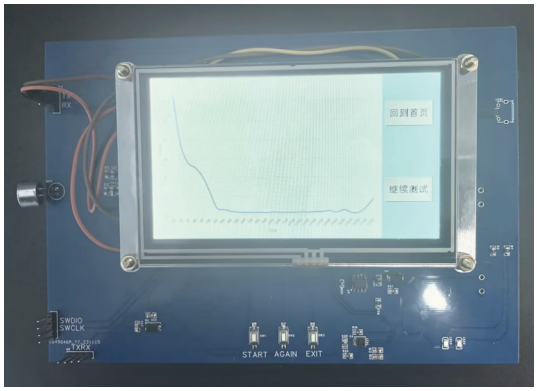


图 9　最终测试效果

失真度和频响范围的详细测试结果如下所述。

4.1　失真度的测试结果

为覆盖市面上大部分音响的频响范围，在测试中选择了 50 Hz、60 Hz、70 Hz、80 Hz、90 Hz、100 Hz、200 Hz、300 Hz、400 Hz、500 Hz、600 Hz、700 Hz、800 Hz、900 Hz、1 kHz 的正弦波信号作为低频的测试部分；选择 5 kHz、7.5 kHz、10 kHz、12 kHz、13 kHz、14 kHz、15 kHz、16 kHz、17 kHz、18 kHz、19 kHz、20 kHz、21 kHz、22 kHz 的正弦波信号作为高频的测试部分，测试结果如表 1 所示，总频率响应曲线如图 10 所示。

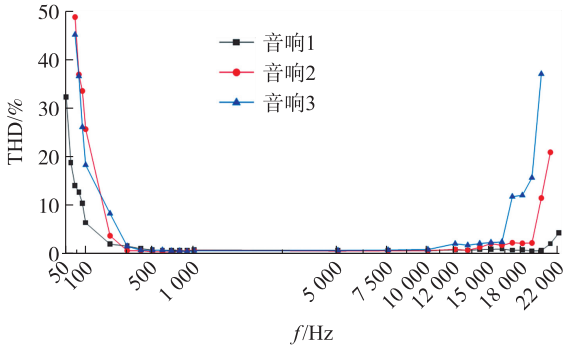


图 10　总频率响应曲线

表 1　失真度测试结果

理论频率/Hz	音响 1/%	音响 2/%	音响 3/%
50	31.353	—	—
60	17.823	—	—
70	13.057	48.876	45.218
80	11.759	37.025	36.665
90	8.417	33.623	26.175
100	4.390	25.741	18.342
200	0.818	3.720	5.291
300	0.695	0.649	0.756
400	0.649	0.621	0.719
500	0.583	0.442	0.695
600	0.547	0.381	0.683
700	0.548	0.358	0.636
800	0.529	0.451	0.605
900	0.460	0.535	0.614
1 000	0.449	0.531	0.621
5 000	0.485	0.556	0.681
7 500	0.492	0.615	0.737
10 000	0.489	0.647	0.756
12 000	0.572	0.686	2.065
13 000	0.549	0.738	1.782
14 000	0.564	0.896	2.124
15 000	0.547	2.117	2.339
16 000	0.545	1.742	2.430
17 000	0.506	2.293	11.813
18 000	0.451	2.163	12.067
19 000	0.429	2.245	15.696
20 000	0.485	11.511	37.116
21 000	1.098	20.968	—
22 000	3.327	—	—

注：“—”表示未测到，表明该频率下无法检测到信号。

4.2　频响范围的测试结果

根据失真度的测试数据，可以得到音响的频响范围和频响范围内平均失真度，具体数据如表 2 所示，频响范围内的频率响应曲线如图 11 所示。同时规定当频率小于等于 1kHz 时属于低频范围，当频率大于 1 kHz 时属于高频范围，则音响在不同范围的平均失真度如表 3 所示。

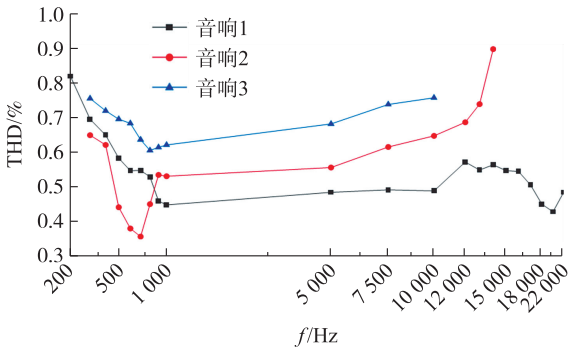


图 11　频响范围内频率响应曲线

表 2 频响范围测试结果

音响	频响范围下限/Hz	频响范围上限/Hz	频响范围内平均失真度/%
音响 1	200	20 000	0.542
音响 2	300	14 000	0.579
音响 3	300	10 000	0.682

表 3 不同范围内的平均失真度

音响	低频范围平均失真度/%	高频范围平均失真度/%
音响 1	0.586	0.510
音响 2	0.496	0.690
音响 3	0.673	0.699

将以上测试数据与音响设备厂家提供的参数进行对比:音响 1 的官方数据为:频响范围 100 Hz~20 kHz,失真度≤0.5%;本系统实测参数为:频响范围 200 Hz~20 kHz,失真度为 0.542%。音响 2 的官方数据为:频响范围为 200 Hz~15 kHz,失真度≤0.5%;本系统实测参数为:频响范围 300 Hz~14 kHz,失真度为 0.579%。音响 3 的官方参数为:频响范围 200 Hz~12 kHz,失真度≤0.6%;本系统实测数据为:频响范围 200 Hz~10 kHz,失真度为0.682%。对比官方数据与本系统的实测数据可以看出,两者较为接近,本系统具有较高的检测精度和可靠度。

本系统除了能够给出如频响范围和失真度等官方数据中经常出现的参数,还能分析得到一些官方并未给出数据:音响 1 在高频范围内的平均失真度最低,在高频范围表现最好;音响 2 在低频范围内的平均失真度最低,具有最好的低频范围表现。由频率响应曲线可以看出,音响 3 在频响范围内具有最平坦的曲线,即声音的相对均衡性最好,在听觉上有更好的体验。

5 结束语

本文实现了一种音响设备测试系统,本系统基于 STM32F407VET6 主控芯片,配合 TPS5430 电压转换芯片,借助外置 16 位高精度 ADC 芯片 AD7683,通过 FFT 算法,可以完成音响设备的失真度和频响范围的测量。本系统的特征是:测试精度高,测试速度快,结果显示直观,操作简便,且易携带,能够很好地弥补已有的信号分析仪的缺点,填补了市面上缺少音响品质测试仪的空白。通过对三台音响的实际测试,结果表明,该系统具有较高的测试精度和可信度,具有较高的实用价值,能够满足实际使用需求。

参考文献:

[1] 音响相关名词解释[N]. 中国电子报,2002-07-25.

[2] 王瑞轩,盖怡臣,李鸿博,等. 基于 STM32 的正弦波失真度测量仪的设计[J]. 自动化技术与应用,2023,42(6):9-12.

[3] Sivaraman P, Sharmeela C. Power Quality in Modern Power Systems[M]. London,UK:Academic Press,2021:61-103.

[4] 孙伟,郭宝龙,陈龙. 一种新的音频分析系统的实现方法[J]. 仪器仪表学报,2009,30(11):2249-2254.

[5] 王原俭. 超低失真计量[J]. 计量技术,1995(7):29-31.

[6] Henry M. An Ultra-Precise Fast Fourier Transform[J]. Measurement,2023,220:113372.

[7] 朱永前,李霄. 在 FPGA 上实现 FFT 的高效串行流水线结构[J]. 火控雷达技术,2023,52(2):61-65.

[8] 段小东,顾立志. 高性能基 4 快速傅里叶变换处理器的设计[J]. 计算机工程,2008,34(24):238-240,243.

[9] 吴岱金,张桦. 串行模数转换芯片 AD7683 在雷达自动检测电路中的应用[J]. 国外电子元器件,2005(6):43-45.

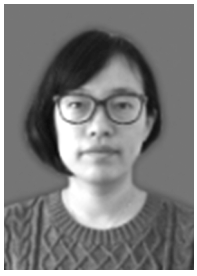
[10] 潘晓明,龚军,汪小燕. 正确运用 Multisim 器件模型仿真 NE5532 最大输出幅值[J]. 实验室研究与探索,2018,37(8):98-101.

[11] 李守闯. 实时频谱分析仪信号处理技术研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2023.

[12] 张名武,李舜酩. 数字信号处理中加窗问题的综述[J]. 工业控制计算机,2022,35(6):119-121,125.

[13] 黄山. 信号的高精度采样中栅栏效应及克服方法[J]. 四川联合大学学报(工程科学版),1997(6):91-94.

刁楚涵(2003—),男,汉族,山东淄博人,山西大学本科生,主要研究方向为嵌入式系统和电子通信等,diaoch0205@126.com;



王 艳(1977—),女,汉族,山西太原人,山西大学副教授,主要研究方向为非线性光学、电子通信等,Annie@sxu.edu.cn。