

声波信号检测系统

DFZK-AT2000

一、系统概述

本系统为高精度声波信号检测与分析平台，集成音频信号分析、频率特性测量、高速信号激励、信号调理及多类型传感器，适用于声学测量、谐振追踪、换能器检测及指向性测试等应用场景。系统支持从 10 μHz 至 2 MHz 的宽频带分析，具备 120 dB 以上动态范围，可满足科研与工业级声学测试需求。

- 基于阻抗分析和频率响应测试原理
- 测量系统频宽响应与灵敏度
- 确定换能器谐振频率 (f_s) 与反谐振频率 (f_p)
- 用于水下声学和超声检测应用

1. 系统架构框图

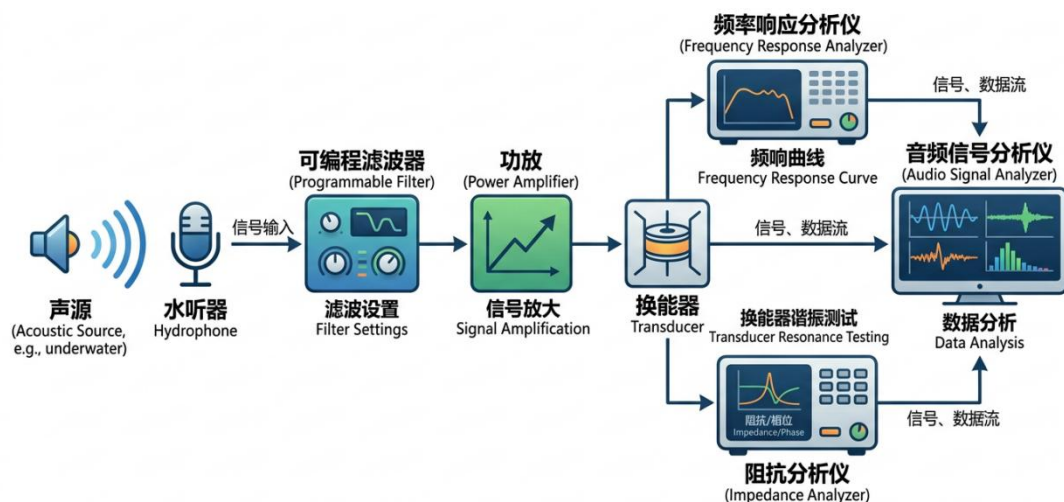
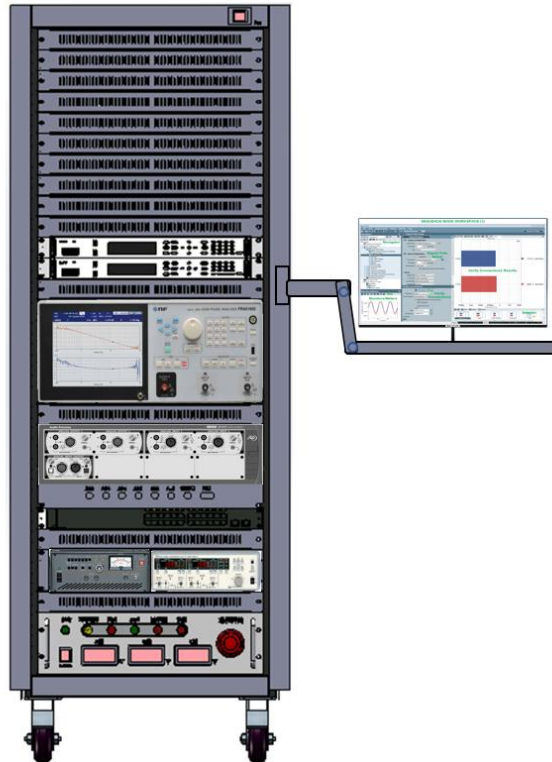


图 1 声波信号检测平台概图(仅供参考)

通过比对输入激励信号与输出响应信号，在频域/时域中提取被测对象的声学特性（传递函数、谐振频率、幅频/相频响应等）。

二、功能描述



系统由音频分析模块、频率分析模块、功放单元、滤波器单元，测试供电单元，系统供电单元以及工控机组成。集成在标准 42U 机柜内，底部设置有外向轮，右侧放置有可活动的显示器以及操作台。由 220V，50Hz 市电驱动，总功率≤5KW。并在最上方预留有扩展空间，可以依据需求，添置其他测试单元，例如示波器单元、供电单元、频谱测试单元等。

三、基本原理

3.1.传递函数测量（幅值/相位/脉冲响应）

使用的模块：音频分析模块

原理说明：

系统向被测设备（DUT）发射一个已知的扫频信号（Chirp 信号）或白噪声/伪随机信号。同时采集输入端的参考信号（激励）与输出端的响应信号，两者经 ADC 同步采样后送入分析仪。

在频域中通过互功率谱/自功率谱计算系统传输函数：

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}$$

其中 S_{xy} 为激励与响应的互功率谱， S_{xx} 为激励的自功率谱。

- **幅值响应：** $|H(f)|$ ，反映系统对不同频率信号的增益/衰减；
- **相位响应：** $\angle H(f)$ ，反映系统的相位延迟特性；
- **脉冲响应：**对 $H(f)$ 做**逆傅里叶变换（IFFT）**，得到时域脉冲响应，可用于分析回波、混响时间等。

3.2.频率特性分析（谐振追踪）

使用的模块：频率分析模块

原理说明：

- 采用****数字锁相放大（Digital Lock-in Amplifier）原理，也称频率响应分析（FRA, Frequency Response Analysis）**技术**。
- 分析仪内部产生一个频率可调的正弦激励信号，注入被测系统的输入端。
- 同时在被测系统输出端采集响应信号，通过**相关检测法（相干解调）**，仅提取与激励信号同频的分量：

$$X = \frac{2}{T} \int_0^T v_{out}(t) \cdot \sin(2\pi f_0 t) dt$$

$$Y = \frac{2}{T} \int_0^T v_{out}(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) dt$$

其中 X、Y 为输出信号在同相与正交轴上的投影分量。

- **幅值** $A = \sqrt{X^2 + Y^2}$ ，**相位** $\theta = \tan^{-1} \frac{Y}{X}$ 。
- 在 10 μHz ~ 2 MHz 范围内**逐点扫频**，即可得到完整的幅频曲线。
- **谐振频率测试：**当激励频率等于系统谐振频率时，幅值达到极大值（增益峰值），相位发生 $\pm 90^\circ$ 突变，由此精准识别谐振点。
- **在线动态追踪：**系统在带负载状态下持续扫频，当谐振频率随工况漂移时，系统可实时追踪峰值变化。

独特优势：锁相放大技术具有极强的**窄带滤波能力**，可有效抑制噪声干扰，因此实现了 140 dB 的超高动态范围。

3.3.换能器的激励与驱动

使用的模块：音频分析模块/频率响应分析模块、滤波器模块、功放模块

原理说明：

换能器（压电陶瓷等）需要高压交变信号激励才能产生声波。

由音频分析模块或频率响应模块提供低电压正弦扫频信号（通常为 $\pm 10\text{ V}$ 内），该信号经

功放单元进行功率放大,输出高压驱动信号。(本系统能力最高可达 $\pm 300 \text{ Vp-p}$ 、DC~500 kHz) 可编程滤波器在信号路径中起到抗混叠滤波/带外噪声抑制作用,确保输出到换能器的信号纯度,避免谐波分量干扰测量。

换能器在高压信号驱动下产生机械振动,向介质(空气/水)中辐射声波。

单发单收模式:一个换能器作为发射源,另一个(或同一对中的另一个)作为接收器,测量声波在介质中传播后的衰减、时延和频响。

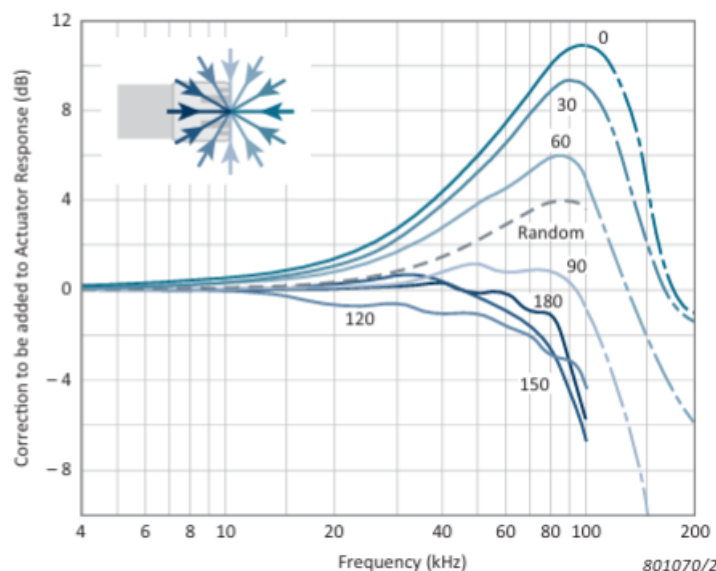
3.4.声信号接收和转换

使用模块:传声器(空气声)、水听器(水声)

原理说明:

(1) 空气传声器

传声器采用电容式(电容麦克风)原理。声波推动振膜振动,改变振膜与背板之间的电容。配合供电模块提供极化电压(通常 200 V)与前置放大器电源,将电容变化转换为电压信号。球形指向性(全指向)意味着传感器在所有方向上灵敏度均匀,适合接收来自任意方向的声波,适用于自由场声压测量及指向性测试中的参考接收。

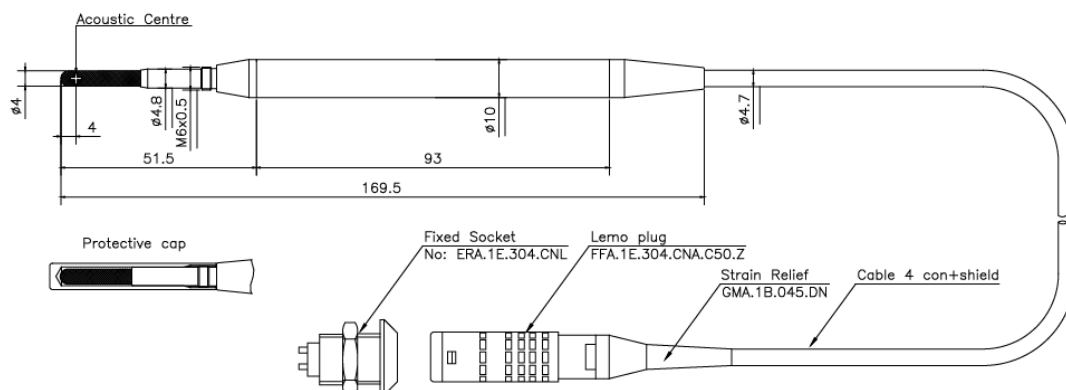


2 本系统使用的传声器频率响应范围

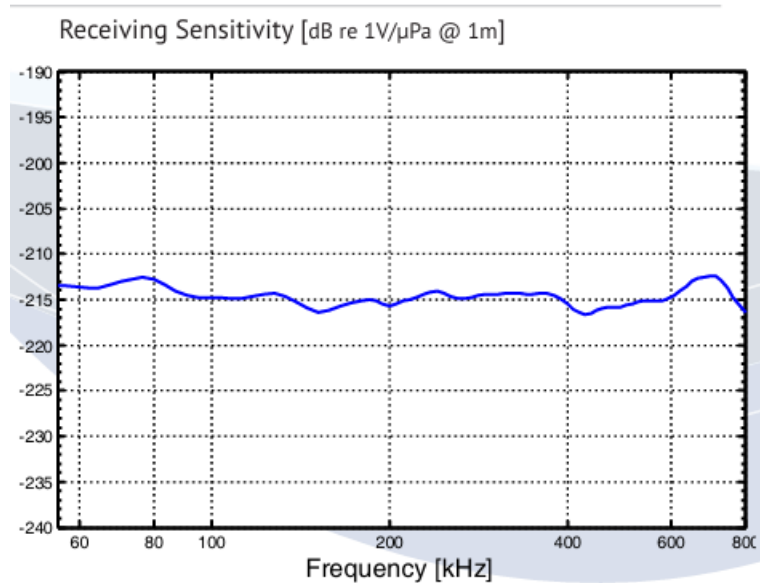
(2) 水听器

水听器采用压电陶瓷(PZT)换能原理。水中的声波压力使压电元件产生形变,压电效应转换为电荷信号。

内部集成前置放大器,通过 10 米缆线连接至采集设备,将微弱的电荷信号转换为低阻抗电压信号传输,减少长线缆带来的噪声。本系统的相关附件在 $1 \text{ Hz} \sim 120 \text{ kHz}$ 范围内具有平坦的灵敏度,适合水下声波接收。



3 水听器外观尺寸与结构



4 常见的水听器频率与接收灵敏度关系

3.5.机械硬件

使用模块：滑轨 + 转台（±10°），依据实际工况定制。

原理说明：

- 被测声源（换能器）固定于转台上，接收传感器（传声器/水听器）固定在距声源一定距离处。
- 转台带动声源在 ±10° 范围内旋转，每次旋转一个固定步进角，测量该角度下的接收信号幅值。
- 记录各角度下的灵敏度/声压级变化，绘制指向性极坐标图：

$$D(\theta) = 20 \log_{10} \left(\frac{P(\theta)}{P(0^\circ)} \right)$$

其中 $P(\theta)$ 为旋转角度 θ 时的接收声压， $P(0^\circ)$ 为轴向（ 0° ）的声压。

- 该系统为**手动调节**——操作人员手动旋转转台至指定角度，记录数据后进入下一角度，适合少量离散角度的测量。

3.6.原理汇总

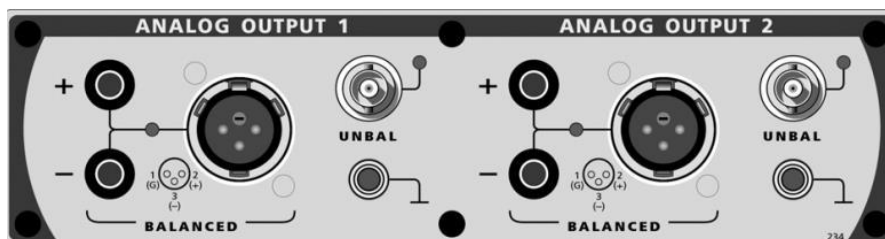
测试类型	激励方式	响应测量	分析手段	频率范围
传输函数测量	Chirp/噪声	麦克风/水听器	FFT + 传递函数	0.1 Hz ~ 80 kHz (AP)
频率特性/谐振	正弦扫频	电压/声信号	锁相放大 (FRA)	10 μ Hz ~ 2 MHz
脉冲响应	脉冲信号	麦克风	IFFT	DC ~ 80 kHz
指向性测试	单频/扫频	麦克风/水听器	幅值归一化	手动各角度测量
在线谐振追踪	正弦扫频	电压	FRA 连续扫频	带负载工况

四、模块能力

2.1 声波信号检测（音频分析仪）

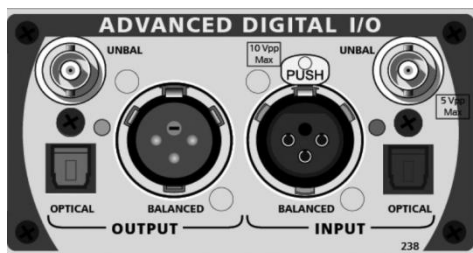
功能：高精度音频信号分析，传递函数测量（幅度/相位响应、脉冲响应）

输入输出：2 路 Balance/unBalance input/output



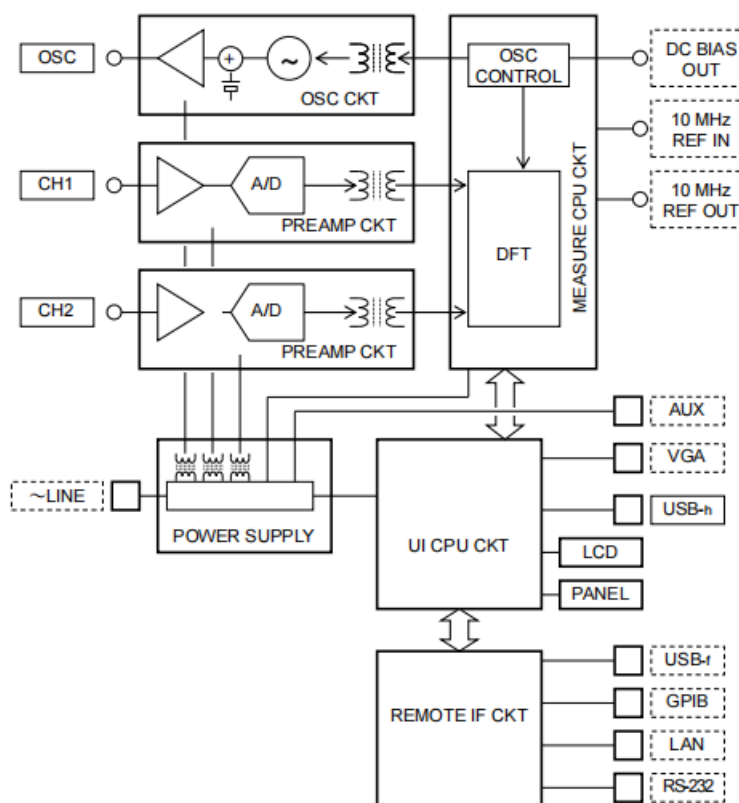
5 输入输出接口示意图

数字接口：AES/EBU、TOSLINK、SPDIF



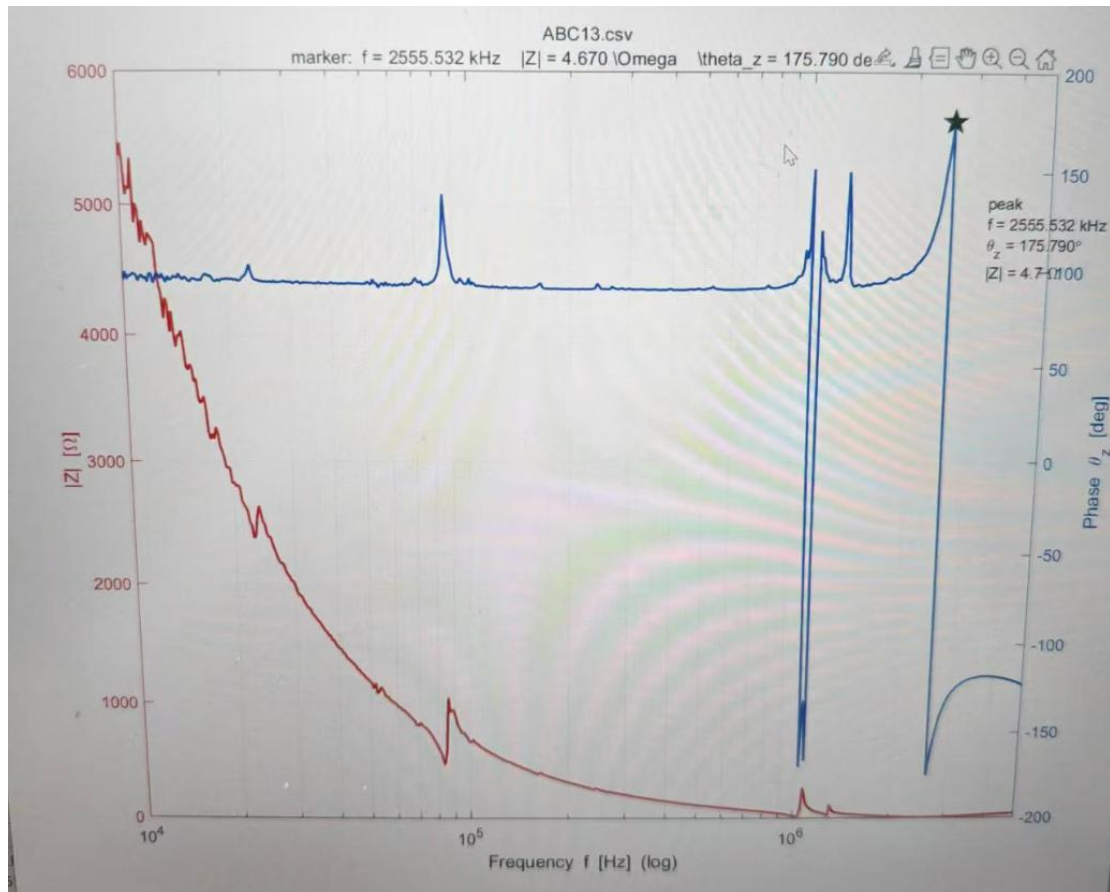
采样率：最高 192k / 216k Hz
 模拟通道输入：2Channels, 24bit ADC
 分析带宽 (RBW)：1MHz
 FFT 分析：1.2M Points
 最大输入电压：230Vpk
 信号输出范围：0.1 Hz ~ 80.1 kHz 高保真信号

2.2 频率特性分析仪 (FRA)



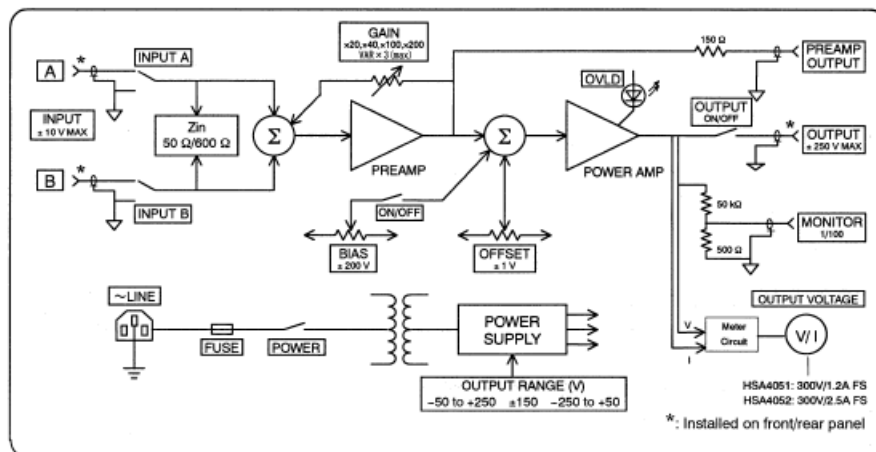
6 频率分析模块内部 Block

模块能力：
 频率范围：10uHz~2MHz
 功能：谐振频率测量、整机在线动态扫频
 动态范围：140 dB (10 Hz ~ 1 MHz)，>80 dB (>1 MHz ~ 2 MHz)
 输入通道：2CH
 最大输入电压：600Vrms



7PZT 阻抗&相位与频率测试例图

4.3.功率放大器



8 功率放大器内部结构图

功率放大器模块参数：
 工作频率：DC~500KHz
 输出电压：300Vpp
 输出电流：5.66App
 转换速率：450V/us

4.4 可编程滤波器



通道：2（CH-A、CH-B）

滤波模式：LP-MF(最大平坦型低通)、LP-PL(相位直线型低通)、HPF(高通)、BPF(带通)、BEF(带阻)、THRU

连接方式：独立使用、级联

截止频率：LPF：1Hz~1.59MHz、

HPF, BEF：1Hz~500kHz、

BPF：1Hz~1MHz 2 1/2 数字设定

衰减斜率： $\geq 48\text{dB/oct}$

五、其他附件

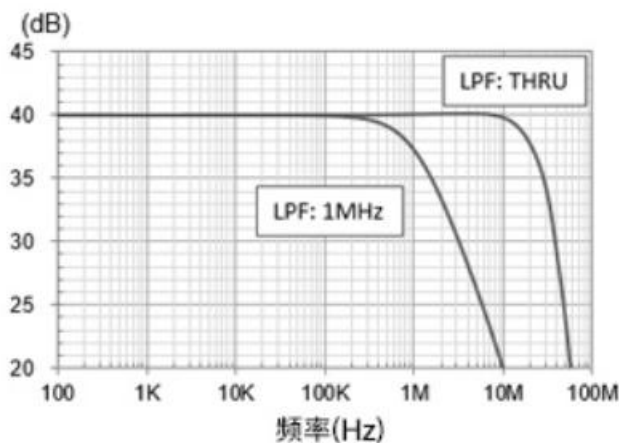
5.1 传声器（麦克风），参照模块 3 基本原理

5.2 水听器，参照模块 3 基本原理

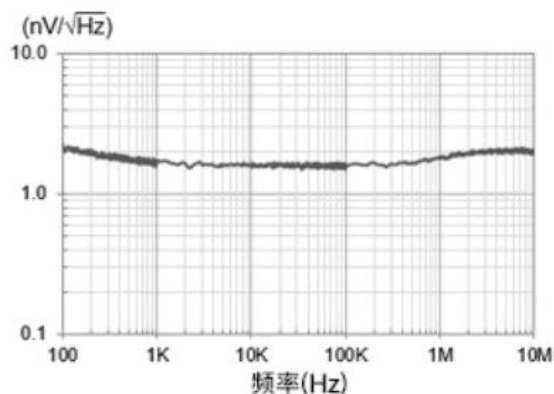
5.3.低噪声前放模块



9 放大器模块图示



10 低噪声前放频率与增益曲线



11 输入换算噪声电压密度

输入方式：直流耦合、平衡差分输入，SMA 接头； $1\text{M}\Omega/100\text{M}\Omega/\text{Open}/60\text{pF typ.}$

输入范围： $\pm 1\text{V}$ （差分）， $\pm 7.5\text{V}$ （同相）

CMRR：90dB 以上（10Hz~10KHz），60dB（1MHz）

输入噪声谱密度： $1.8\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

增益： $40\text{dB} \pm 0.1\text{dB}$ 以内（1KHz）

最大输出电压： $\pm 10\text{V}$ 、 $1\text{K}\Omega$

输出阻抗： 50Ω （1KHz）

电压频率范围：DC~20MHz；+0.5dB，-3dB

5.4.供电单元（依据被测件具体参数选择）

六、系统技术总表与具体应用配置

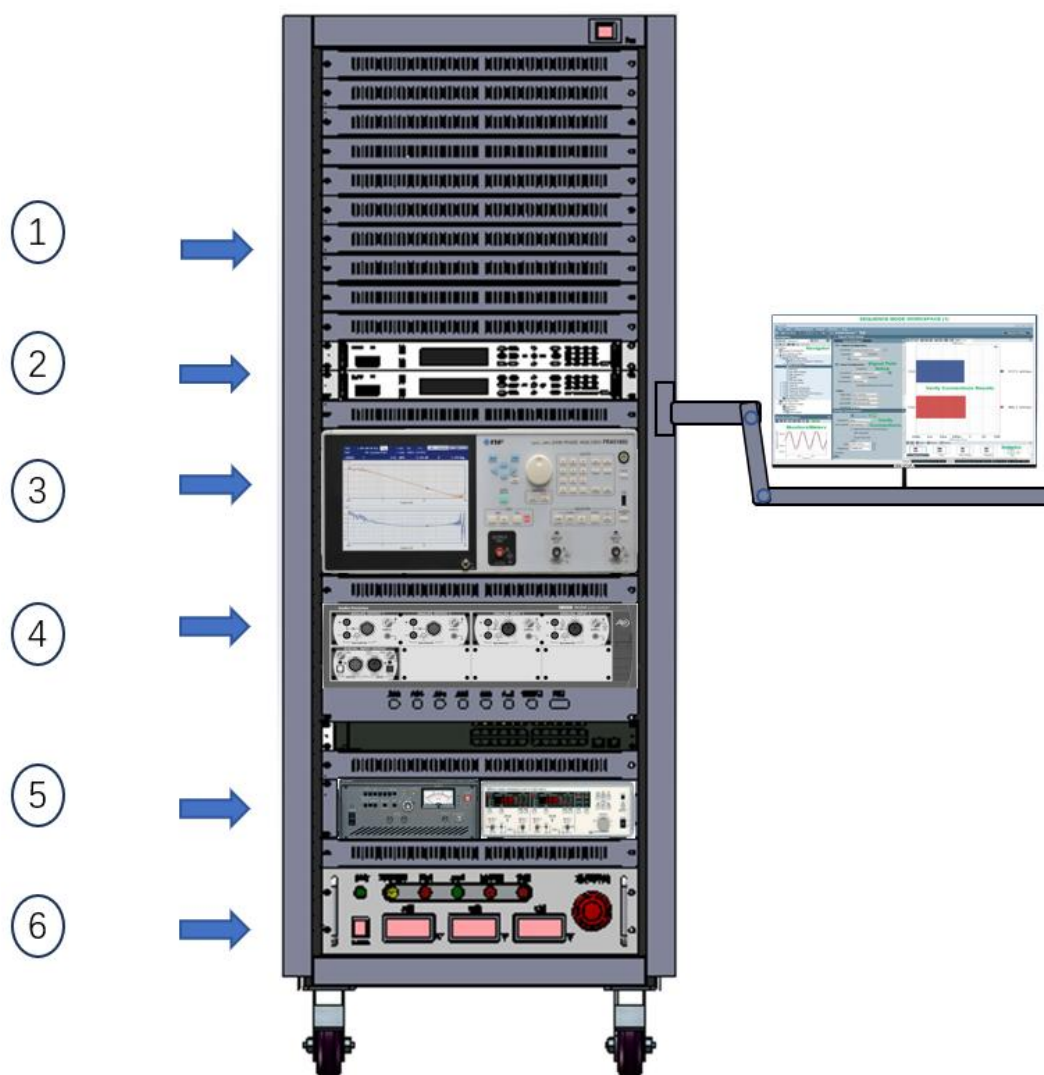
6.1. 系统技术总表

参数项	规格
系统频率范围	0.1 Hz ~ 2 MHz（激励/分析）
最大输入电压	600 Vrms（FRA 通道）
系统动态范围	≥ 120 dB
FFT 分析能力	1.2M 点
采样精度	24-bit
信号激励最高电压	300 Vp-p（经放大器驱动至高阻抗负载）
驱动换能器电压需求	1200 V（100–200 kHz，需外部升压匹配，单发单收模式）
传感器类型	空气传声器（全指向）、水听器
机械扫描角度	±10°
滤波器带宽	1 Hz ~ 1.59 MHz（低通）

6.2. 典型应用场景与模块搭配

应用场景	使用模块组合
换能器谐振频率在线追踪	频率响应模块 + 功率放大模块 + 滤波器单元
空气声学指向性测试（±10°）	音频分析模块 + 传声器 + 滑轨转台
水下声波信号检测	音频分析模块 + 水听器
高保真音频传输函数测量	音频分析模块

6.3.系统概图（具体模块以实际配置为准）



- 1,预留的扩展空间；2，测试电源单元；3，频率响应单元；4，音频分析单元；
5，功放模块与滤波模块；6，工控机

