

T/CASME

中国中小商业企业协会团体标准

T/CASME XXXX—XXXX

网络数字水听器

Network digital hydrophone

(征求意见稿)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国中小商业企业协会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 3

5 基本结构 4

6 参数 4

7 原材料 4

8 技术要求 5

9 试验方法 7

10 检验规则 9

11 标志、随机文件、包装、运输、贮存 10

附录 A（规范性附录） 等效输入噪声测试 12

附录 B（规范性附录） 通频带测试 14

附录 C（规范性附录） 谐波失真测试 15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及下列专利：

201811089362.7 一种基于PTP同步的传感器数据采集传输系统和方法；

201910140614.2 一种基于PTP协议的级联同步数据采集及传输系统。

本文件由中国中小商业企业协会提出并归口。

本文件主要起草单位：武汉海晟科讯科技有限公司。

本文件参与起草单位：湖北大学、海鹰企业集团有限责任公司、无锡市海鹰加科海洋技术有限责任公司、无锡市特瑞声电子有限公司、华中科技大学。

本文件主要起草人：许乔、王旭光、张丹、桂征服、杜天为、黄高进、尹凌志、谢思港、刘海龙、申扣喜、高峰、程华、章繁荣、杨恺、陈钧、陈思朦、张运佳。

网络数字水听器

1 范围

本标准规定了网络数字水听器的术语和定义、基本结构、参数、技术要求、试验方法、检验规则、标志、随机文件、包装、运输及贮存。

本标准适用于用作 10 Hz ~ 100 KHz 频率范围内工作计量器具,采用数字信号完成通信并可实现数据大规模同步上传的网络数字水听器。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 191 包装储运图示标志
- GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验A: 低温
- GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分: 试验方法 试验B: 高温
- GB/T 2423.3 环境试验 第2部分: 试验方法 试验Cab: 恒定湿热试验
- GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分: 按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划
- GB/T 3947 声学名词术语
- GB/T 4128 声学 标准水听器
- GB/T 4130 声学 水听器低频校准方法
- GB/T 6587 电子测量仪器通用规范
- GB 4793.1 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第1部分: 通用要求
- GB/T 9969 工业产品使用说明书 总则
- GB/T 13306 标牌
- GB/T 25931 网络测量和控制系统的精确时钟同步协议
- JJF 1034 声学计量术语及定义
- YD/T 2375 高精度时间同步技术要求
- YD/T 3075 高精度时间同步互通技术要求和测试方法

3 术语和定义

GB/T 3947、JJF 1034、GB/T 25931 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

网络数字水听器 Network digital hydrophone

在传统模拟水听器的基础上,增加微型控制器与处理器,在完成模拟信号的采集调理后,通过内置的 PTP 协议栈、高精度同步算法和基于 TCP/IP 协议的以太网透明交换传输技术,可以通过网线实现的

业务数据传输、同步报文和供电，也可以快速组阵，具备阵列扩展能力，使多个水听器的采集节点在限定的时间误差内实现大量传感器数据同步采集的水声采集系统。

3.2

谱级 spectrum level

信号在某一频率的谱密度与基准谱密度之比的以 10 为底的对数，通常用 dB 为单位。

3.3

动态范围 dynamic range

网络数字水听器的过载声压级与等效噪声声压级之差。

3.4

声压灵敏度 pressure sensitivity

声压水听器的输出电压与作用在水听器接收面上的实际声压的比值。

3.5

谐波失真 harmonic distortion

d_h

谐波分量的方均根值与整个信号的方均根值之比。

注：谐波失真以百分数（%）表示。

3.6

精度 accuracy

在一个测量集上，待测时钟与理想参考时钟或频率误差的平均值。稳定性是度量平均值如何随着时间、温度等变量的变化而改变。精度是度量对平均值误差的偏离。

3.7

数据 data

信息的可再解释的形式化表示，可适用于通信、解释及处理。

3.8

协议 protocol

一套标准化的规则，它规定通信网中各种技术、操作、接口等如何进行会话，它包括信息帧的格式、时序、信息帧的顺序以及差错检验等。

3.9

数字接口 digital interface

两个系统之间或同一个系统的两部分之间提供数字信号传输和交换的公共物理边界或公共逻辑边界。

3.10

TCP/IP 协议 TCP/IP protocol

互联网的协议集，最初它是为 Unix 网络系统设计的，其设计目的是使各种计算机都能在一个共同的网络环境中运行，实现异机种、异网络之间的通信。现在已为绝大多数计算机网络系统使用，也是因特网最基本的协议。TCP/IP 是一个完整的协议族。除了本身的两个协议 TCP 和 IP 之外，还包括多种其他协议。

3.11

100 Base-T

IEEE 802.3 为 100 Mbit/s 以太网制定的标准。如果它使用两对无屏蔽双绞线实现，称为 100 Base TX;也可用 4 对无屏蔽双绞线实现，称为 100 Base T4;若用光缆实现，称为 100 Base FX。

3.12

1000 Base-T

采用 4 对 5类 UTP 双绞线，传输距离为 100 m,传输速度为 1 Gbit/s。

3.13

精确时间同步协议 precision time protocol PTP

由 GB/T 25931 定义的协议。

3.14

协议栈 protocol stack

协议描述了信号的时序和通讯数据的结构，也定义了与其他系统的通讯方式。协议栈则定义了生产商如何使他们的产品与其他厂商生产的产品兼容。协议栈在较低层定义了生产商为使自己的产品与其他厂商生产的产品进行互联必须遵循的规则;在较高层则定义了如何管理不同类型的通讯会话用户的应用程序，用户的应用程序如何才能实现互操作。

4 缩略语

下列缩略语适用本文件：

ADC	模数转换器	Analog to Digital Converter
dB	分贝（工程应用）	Decibel
GND	接地（电压等级）	Ground (Voltage Level)
IP	因特网协议	Internet Protocol
NTP	网络时间协议	Network Time Protocol
PS	处理系统	Processing System
PTP	精确时间同步协议	Precision Time Protocol

TCP	传输控制协议	Transmission Control Protocol
UTP	非屏蔽双绞线	Unshielded Twisted Pair
VCC	电路电压	Voltage To Current Converter
VOUT	输出电压	Voltage Out

5 基本结构

网络数字水听器主要由以下部分构成：

- a) 模拟水听器；
- b) 信号调理与数字化模块；
- c) 电源模块；
- d) 核心处理控制模块；
- e) 合金水密舱体外壳；
- f) 转接设备；
- g) 水密电缆；
- h) 上位机控制平台。

6 参数

6.1 参数

产品的参数应符合表 1 所示。

表 1 基本参数

项目	参数
信号频段	10 Hz ~ 100 KHz
谐波失真	≤ -75dB @1kHz（增益为 1 时）
最大采样频率	256 Ksps
等效输入噪声	<2 μ Vrms
固定增益	20 dB
可变增益	80 dB
采样精度	24 bit
数据协议	TCP/IP
数字接口	2×100/1000 Base-T
PTP 超精密网络数据同步精度	± 50ns
	（40 跳级联）± 150ns
功耗	≤ 5W

7 原材料

7.1 网络数字水听器应符合本标准的要求，并按照经规定程序批准的工艺及技术文件制造。

- 7.2 水听器暴露于水中的所有金属和非金属部件均应采用耐腐蚀的材料制作。
- 7.3 水密电缆所用材料应耐高水压、耐腐蚀、耐磨损，也应符合安全、环保相关的规定。
- 7.4 产品所用的其余辅料应符合有关标准或相关规定的要求，必要时可进行质量检测和化验。

8 技术要求

8.1 外观

- 8.1.1 网络数字水听器的外观应整洁，表面不应有明显的凹痕，划伤、裂缝、变形、毛刺、霉斑等缺陷，表面涂层不应起泡、脱落。
- 8.1.2 网络数字水听器的各零部件应紧固无松动。
- 8.1.3 产品表面的文字和图形符号（如有）应明确、清晰、牢固。
- 8.1.4 产品的连接线应固定牢靠不外露。

8.2 尺寸偏差

产品实际尺寸与标示尺寸相符，允许偏差为 $\pm 0.1\%$ 。

8.3 功能

8.3.1 功能

网络数字水听器应具有以下功能：

- a) 应具备水下声信号采集, 信号放大、调理、存储等基本功能；
- b) 内置 PTP 协议栈和高精度同步算法, 可用 PTP 对组网使用的所有智能数字水听器采集节点进行对时。通过基于 PTP 网络精密时钟同步技术的应用，产品能实现从时钟功能，使得所有的网络数字水听器采集节点能在限定的时间误差内（小于百纳秒）实现海量传感器数据的同步采集（专利号：201811089362.7）；
- c) 采用 TCP/IP 协议的以太网透明交换传输技术，水听器只需两个网络接口，业务数据、同步报文和供电都通过网线传输，可实现即插即拔单独或小规模使用，也可以快速成阵，具备大规模超大规模阵列的扩展能力（专利号：201910140614.2）。

8.3.2 选配功能

网络数字水听器具有以下选配功能：

- a) 每只水听器可支持多通道数据采集；
- b) 可拓展最大工作深度至 6000 米；
- c) 可额外加装信息存储模块。

8.4 性能指标

8.4.1 声压灵敏度

应不低于 $-210\text{dB} \pm 2\text{dB}$ 。

8.4.2 等效输入噪声

产品的等效输入噪声应小于 $2\ \mu\text{V}_{\text{rms}}$ 。

8.4.3 噪声谱级

产品的噪声谱级应不大于 45dB。

8.4.4 通频带

产品应满足在通频带截止频率处出现 -3 dB 衰减的要求，同时在通带内，信号的衰减程度较稳定，带内平坦度较高。

8.4.5 谐波失真

产品的总谐波失真不超过 -75 dB。

8.4.6 可变增益电路增益误差

产品的可变增益电路增益误差应不大于 0.5 dB。

8.4.7 功耗

产品的功耗应不超过 5 W。

8.4.8 数据传输

产品经数据传输测试，输入信号频率为在 10 Hz、100 Hz 两种情况下，上位机显示的波形显示应正常，数据的采集上传功能以及指令下发功能均正常。

8.4.9 稳定性

- a) 温度稳定性：在 $0\ ^\circ\text{C} \sim 40\ ^\circ\text{C}$ 的工作范围内，灵敏度级的变化应不大于 $0.05\ \text{dB}/^\circ\text{C}$ 。
- b) 静压稳定性：在 $0\ \text{m} \sim 100\ \text{m}$ 的水深内，灵敏度级的变化应不大于 $0.4\ \text{dB}/\text{MPa}$ 。
- c) 时间稳定性：在校准周期一年的时间内，灵敏度级的变化应不大于 $\pm 1.5\ \text{dB}$ 。

8.4.10 基于 PTP 以太网接口互通性能

应满足以下要求：

- a) 基于 PTP 协议的级联同步数据采集及传输系统，可使采集节点集成 PTP 报文透明中继转发功能；
- b) 采集节点的上行网口和下行网口可通过自适应带宽实现低功耗长期运行。

8.4.11 PTP 数据同步精度

应满足以下要求：

- a) 通过采用 PTP 同步协议及 PTP 主、从时钟，实现超远分布传感器数据同步采样，背靠背同步采集精度应优于 $\pm 50\ \text{ns}$ ；
- b) 在大规模传感器阵列采集时实现各采集节点高精度同步采集传输，40 跳级联同步采集精度应优于 $\pm 150\ \text{ns}$ 。

8.5 电气安全性

除另有规定外，产品的电气安全性应符合 GB 4793.1 的要求。

8.6 环境适应性

8.6.1 高温运行

产品经受温度为 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，时间为 4h 的高温试验，在正常大气条件下恢复 2h，试验后，产品外观和性能应正常。

8.6.2 低温运行

产品经受温度为 $(0 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，时间为 4h 的低温试验，在正常大气条件下恢复 2h，试验后，产品外观和性能应正常。

8.6.3 恒定湿热

产品经受温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 86% ~ 90%，时间为 8h 的湿热试验，在正常大气条件下恢复 2h，试验后，产品外观和性能应正常。

9 试验方法

9.1 检验条件

9.1.1 测试用标准大气条件

网络数字水听器的测试用标准大气条件如下：

- a) 温度： $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ；
- b) 相对湿度：20% ~ 70%；
- c) 大气压强：86 kPa ~ 106 kPa。

9.1.2 主要测试设备

网络数字水听器的主要测试设备如表 2 所示。

表 2 主要测试设备

设备名称	设备型号	作用
示波器	KEYSIGHT DSOX2024A	观察模拟电路的输出信号波形
信号发生器	RIGOL DG4102	为系统提供交流正弦波信号
直流稳压电源	GPS-4303C	为系统提供所需的工作电压
万用表	FLUKE 15B+	检验电路是否出现短路
交流毫伏表	KEYSIGHT 34461A	准确测量模拟电路输出端信号幅值
PC		发送控制指令，显示采集信号的波形

9.1.3 检验测试场所

网络数字水听器的检验测试场所应符合以下要求：

- a) 测试仪器有良好的接地，测试场所要尽量隔离强磁场、强辐射干扰以及火花干扰等外界干扰源，必要时增加一个屏蔽空间，尽量切断空间磁场的干扰；
- b) 确保测试环境的干净整洁；

- c) 测试仪器有序放置，连接线不要交叉纠缠，时刻关注并记录测试空间的温度与湿度；
- d) 相关测试人员要佩戴防静电手环；
- e) 测试环境需明亮，便于观察状态与信号的波形。

9.2 外观

目测和手感检测。

9.3 尺寸偏差

用标准的通用量具进行测量。

9.4 功能

实际操作，逐一检测。

9.5 性能指标

9.5.1 声压灵敏度级

按 GB/T 4130 的规定执行。

9.5.2 等效输入噪声

按附录 A 的规定执行。

9.5.3 噪声谱级

按 GB/T 4128 的规定执行。

9.5.4 通频带

按附录 B 的规定执行。

9.5.5 谐波失真

按附录 C 的规定执行。

9.5.6 可变增益电路增益误差

按图 B.1 所示搭建测试电路，输入信号的频率设为 1 kHz，改变系统的输入信号幅值和两级压控增益模块的增益大小，在输出信号不失真的情况下，用交流毫伏表对两级压控增益的输出信号有效值进行测量，将计算得到实测放大倍数与理论放大倍数进行比较，得到系统的增益误差情况。

9.5.7 功耗

用直流电源为网络数字水听器提供 24 V 工作电压，分别记录在 32 k、64 k、128 k、256 k 采样率下产品的电流，并计算功耗。

9.5.8 数据传输

按图 B.1 所示搭建测试环境信号发生器为提供 100 mVpp 的输入信号，系统采样率设为 256 ksps，通过上位机设置系统总增益为 20 dB，分别观察在输入信号频率为 100 Hz 和 10 Hz 两种情况下上位机显示的波形是否正常。

9.5.9 稳定性

按 GB/T 4130 的规定执行。

9.5.10 基于 PTP 以太网接口互通性能

按 YD/T 3075 的规定执行。

9.5.11 PTP 数据同步精度

按 YD/T 2375 的规定执行。

9.6 环境适应性

9.6.1 高温运行

按 GB/T 2423.2 的规定进行，测试温度 $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，持续时间 4h，恢复时间为正常大气条件下恢复 2h，恢复后的试验样品外观无明显变化，能正常工作。

9.6.2 低温运行

按 GB/T 2423.1 的规定进行，测试温度 $(0 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，持续时间 4h，恢复时间为正常大气条件下恢复 2h，恢复后的试验样品外观无明显变化，能正常工作。

9.6.3 恒定湿热

按 GB/T 2423.3 的规定进行，本试验为样品不工作状态。测试温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ ，相对湿度 86% ~ 90%，持续时间 8h，恢复时间为正常大气条件下恢复 2h，恢复后的试验样品外观无明显变化，能正常工作。

9.7 电气安全性

按 GB/T 6587 的规定执行。

10 检验规则

10.1 检验分类

产品检验分为型式检验和出厂检验。

10.2 组批

以同一工艺或同一原辅材料生产的同一规格产品为一组批。

10.3 出厂检验

10.3.1 每批产品出厂前，均需经工厂检验部门检验合格，方能出厂。

10.3.2 出厂检验项目包括本文件中的外观、尺寸偏差、功能。

10.3.3 抽样方法和抽样数量

出厂检验应进行全数检验，因批量大，进行全数检验有困难时可实行抽样检验，抽样检验方法按 GB/T 2828.1 计数抽样检验程序一次性抽样方案的规定进行，检验水平为 II。合格质量水平 (AQL) 取 6.5；根据表 3 抽取样本。

表 3 抽样数量及判定组 单位：件

批量范围	样本数	合格判定数 (Ac)	不合格判定数 (Re)
26~50	8	1	2
51~90	13	2	3
91~150	20	3	4
151~280	32	5	6
281~500	50	7	8
501~1200	80	10	11
1201~3200	125	14	15
≥3201	200	21	22
注：26 件以下应全数检验。			

10.3.4 判定规则

样本中发现不合格数小于等于表 3 规定的合格判定数 (Ac)，则判定该批产品合格；若样本中发现的不合格数大于等于表 3 规定的不合格判定数 (Re)，可用备用样品或在原批次中加一倍抽样，进行复检，复检结果合格的，该批次判为合格，复检结果仍不合格的，该批次判为不合格。

10.4 型式检验

10.4.1 正常生产时每年进行一次型式检验；有下列情况时也应进行型式检验：

- a) 新产品试制鉴定；
- b) 正式生产时，如原料、工艺有较大改变可能影响到产品的质量；
- c) 出厂检验的结果与上次型式检验有较大差异时；
- d) 产品停产 12 个月以上重新恢复生产时；
- e) 国家质量监督机构提出要求时。

10.4.2 型式检验项目包括要求中的全部项目。

10.4.3 型式检验应从出厂检验合格产品中随机抽取，抽取数量应满足检测要求。

10.4.4 判定规则

当型式检验结果全部符合本文件要求时，判型式检验合格。若检验中出现任何一项不符合，允许加倍重新抽取样品进行复检，复检后，若全部符合本文件要求时，判型式检验合格，否则为不合格。

11 标志、随机文件、包装、运输、贮存

11.1 标志

11.1.1 销售标志应至少含有以下内容：

- a) 产品名称及型号；

- b) 制造厂商及地址;
- c) 执行标准号;
- d) 产品出厂编号;
- e) 产品出厂日期;
- f) 产品合格标识。

11.1.2 产品在适当而明显的位置装有固定标牌, 标牌应符合 GB/T 13306 的要求。

11.1.3 包装箱上的包装储运图示标志按 GB/T 191 的规定选择使用。

11.1.4 标志应清晰、牢固, 不应因运输条件和自然条件而褪色、变色、脱落。

11.2 随机文件

11.2.1 使用说明书

出厂的产品应附有产品使用说明书, 产品使用说明书的编制要求应符合 GB/T 9969 的规定。

11.2.2 其他(如有)

产品所附的其他随机文件(如有)应符合 GB/T 6587 的规定。

11.3 包装

产品包装应保证产品不受损伤, 应防尘、防震, 便于运输和贮存。特殊包装形式可按合同有关规定进行。

11.4 运输

可用一般交通工具运输或按合同规定进行, 产品在运输过程中, 应避免碰撞、抛投和雨雪淋湿。

11.5 贮存

产品应贮存在通风良好、清洁、干燥, 且无腐蚀性气体的场所, 避免重压。

附录 A
(规范性附录)
等效输入噪声测试

A.1 系统测试环境

等效输入噪声测试设备连接应符合图 A.1 的要求，系统采样率设为 256 kps，在不同的控制电压下测试的产品的等效输入噪声。

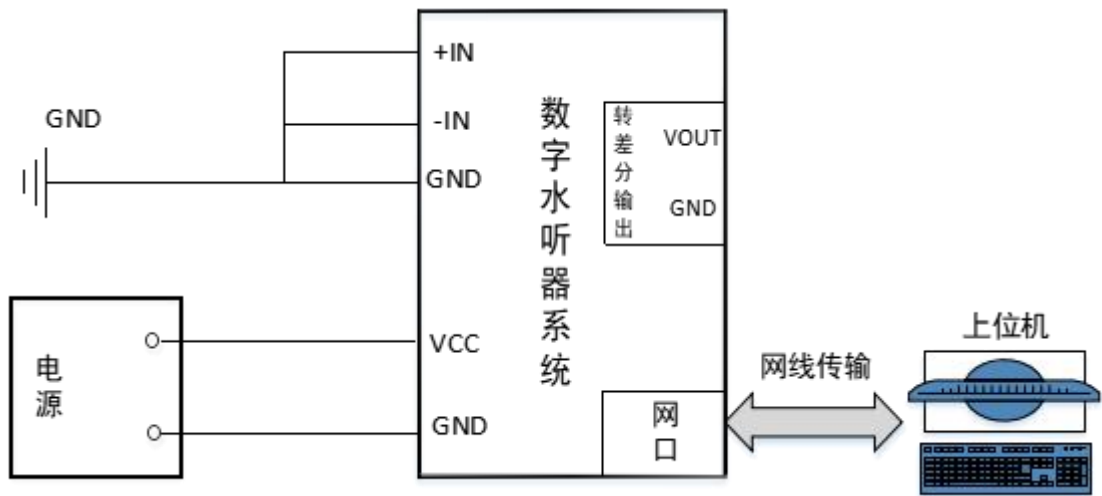


图 A.1 等效输入噪声测试设备连接图

A.2 测试方法

将网络数字水听器的输入端短接到地，水听器系统通过网线与上位机相连，由上位机软件调整系统的可变增益，之后上位机将此时系统的输出数据存储成文件，使用 MATLAB 程序计算出对应的系统等效噪声值。

A.3 MATLAB 运算过程

MATLAB 运算过程见式（1）：

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (S(i) - D)^2}$$

$$D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(i)$$

$$Noise_{rms} = \frac{1}{G_j} \times S \times 10^6$$

..... (1)

其中：

$S(i)$ -- 经 AD 采集卡采集到的前放电路输出端的噪声信号采样值；

D -- 此噪声信号的直流偏移值；

S -- 其噪声均方根值；

G_j -- 第 j 通道的前放板设定增益倍数（转差分后 P 通道、X 通道、Y 通道、Z 通道皆为 400 倍）；

$Noise_{rms}$ -- 当前放板第 j 通道的增益为 G_{pre_amp} 时，噪声的 RMS 值等效到输入端的大小，单位为 μV 。

附 录 B
(规范性附录)
通频带测试

B.1 测试方法

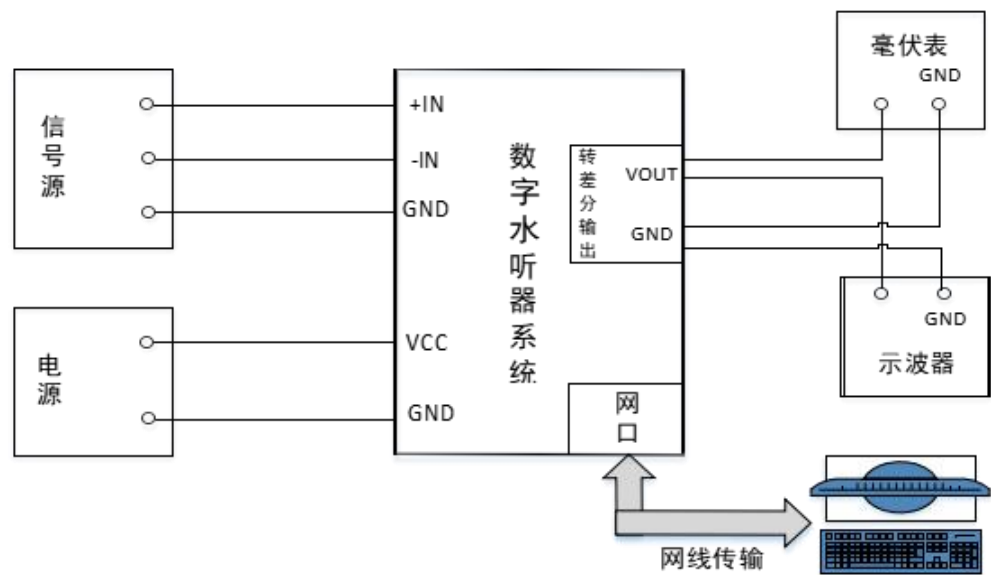


图 B.1 网络数字水听器测试连接图

按图 B.1 的要求连接各测试设备,在网络数字水听器的信号输入端输入 30 mVrms 信号,为保证输出信号达到伏级且输出信号无失真,第一级压控增益模块的控制电压设为 0 V,则对应的增益为 4.4 dB,即 1.66 倍,第二级压控增益的控制电压设为 -0.2 V,对应的增益为 6.42 dB,即 2.09 倍,此时总放大倍数为 34.694 倍。鉴于 ADC 采样率有限,为得到准确的系统频响数据,调整输入信号频率,通过示波器观察信号波形,避免波形出现失真、畸变等情况。使用交流毫伏表测量调理电路末级低通滤波的输出信号电压有效值,以频带内测得的最大输出信号有效值为基准,相应频率下的幅频响应的计算公式见式 (2)。

$$AFR_j=20\times\log_{10}\left(\frac{V_j}{V_{max}}\right)$$

..... (2)

- 其中：
- j — 输入信号的频率
 - AFRj — 频率为 j 时信号对应的衰减程度，
 - Vj — j 频率下对应的实际输出信号的电压有效值，
 - Vmax — 频带内测得的最大输出信号有效值。

附 录 C
(规范性附录)
谐波失真测试

C.1 谐波失真数据采集

按图 C.1 连接网络数字水听器的信号质量测试电路，由信号发生器向网络数字水听器正输入端依次输入 $V_{pp}=1V$ ，频率值 f 为1000 Hz、2000 Hz、3000 Hz、4000 Hz的正弦信号；负输入端输入反向信号（即幅度频率均与正输入端相同，但相位相差180° 的同步差分信号）。将网络数字水听器的增益设置为 0 dB，通过显控软件对所有通道同时进行采样，采样率设置为 32 KSPS，每一通道分别记录 12M 以上大小的数据文件（其中各通道数据文件内包号应连续，且每包点数 64，取其中每通道点数 $N=32768$ 个点进行计算）。

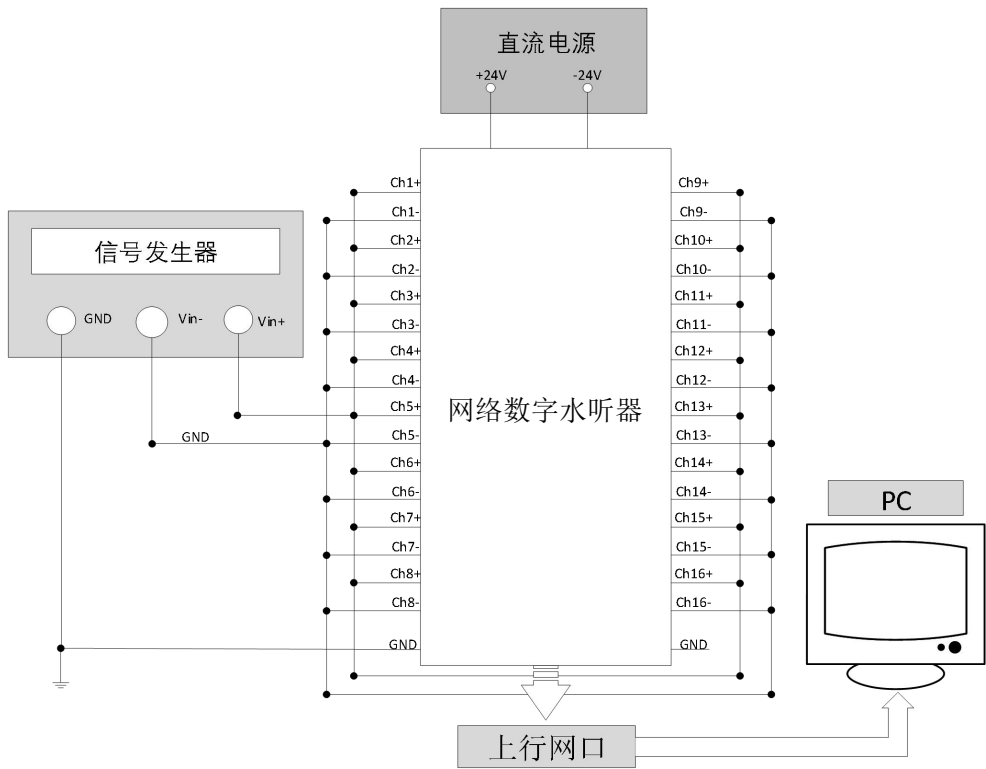


图 C.1 谐波失真测试电路示意图

C.2 谐波失真计算过程

用 C.1 的方法采集完数据后，按照如下步骤经 Matlab 谐波失真程序计算谐波失真：

- a) 将采集到的信号采样值 $x(i)$ 通过加窗进行二次采样，得到新的采样数据 $y_j(i)$ ，见式 (3)：

$$y_j(i) = w_i \times x_f(i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

其中：

j — 通道序号 ($j = 1 \sim 16$)；

i — 采样数据样本序号 ($i = 1 \sim 32768$)。

- b) 按式 (4) 对步骤 a) 得到的数据进行 32768 点的 FFT 计算：

$$Y_j(f) = FFT\{Y_j(i)\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

其中： $Y_j(f)$ — 第 j 通道与频率 f 对应的 FFT 计算结果。

- c) 将 FFT 计算结果取模和其平方，得到功率谱分布；
d) 在功率谱分布中取信号的 2 次、3 次、4 次谐波，按式 (5) 计算谐波失真：

$$THD_j = 20 \times \log_{10} \left(\frac{\sqrt{H_j}}{F_j} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

其中： F_j — 测试信号的基波幅度，为第 j 通道的 2~4 次谐波功率之和；

THD_j — 该信号的总谐波失真（单位为 dB）。

- e) 通过显控软件调整网络数字水听器增益为 0 dB，由信号发生器向网络数字水听器的所有通道输入 $V_{pp} = 50 \text{ mV}$ ，频率 f 同步骤 a)，重复步骤 a)~d)，得到网络数字水听器各个通道在增益为 1 倍时的总谐波失真 THD_j 。
f) 通过显控软件调整网络数字水听器增益为 20 dB，由信号发生器向网络数字水听器的所有通道输入 $V_{pp} = 50 \text{ mV}$ ，频率 f 同步骤 a)，重复步骤 a)~d)，得到网络数字水听器各个通道在增益为 10 倍时的总谐波失真 THD_j 。