

Tech Note 1: 水听器声学校准数据

校准水池 OCR 与 250 Hz 活塞发声器 (PHO) 校准值的关系

Acoustic Calibration Data — The link between OCR measured in Cal tank and Pistonphone OCR at 250Hz

中文翻译版

翻译整理：北京普思优创海洋技术有限公司（普思海洋 Wedynamic Marine）

2026 年

说明

本文档为 Teledyne RESON 官方英文资料的中文译稿，由普思海洋翻译整理，仅供技术参考；文中图表均摘自原厂资料，如有歧义以英文原文为准。产品规格如有变更，恕不另行通知。

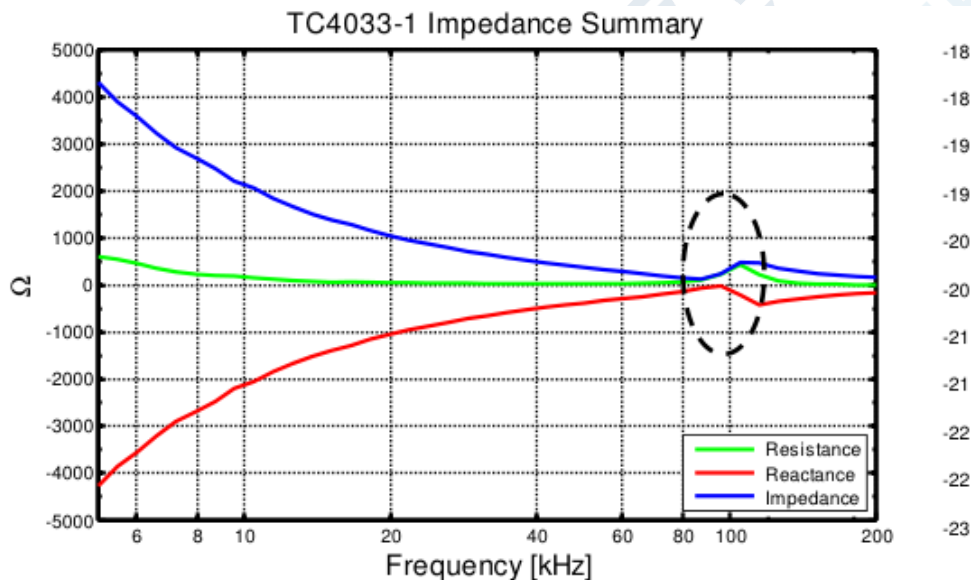


1. 概述

本技术说明介绍 RESON 水听器的校准方法，并解释校准曲线图 (Cal图) 上两个关键数据之间的联系：一是校准水池中实测的开路电压响应 (OCR, Open Circuit Voltage Response)，二是活塞发声器在 250 Hz 下测得的 PHO 校准值。

1.1 水听器的线性从何而来

水听器的线性来自两个基本事实：一是在关心的频率范围内不存在机械共振，传感元件作为“远离共振点”的接收器工作；二是声波波长远大于传感器尺寸。以 1000 Hz 为例，波长为 $1500 \text{ m/s} \div 1000 \text{ Hz} = 1.5 \text{ m}$ ；250 Hz 时波长约 6 m。而水听器传感头尺寸很小——TC4035/TC4038 约 $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ，TC4013 约 $6.4 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$ 。

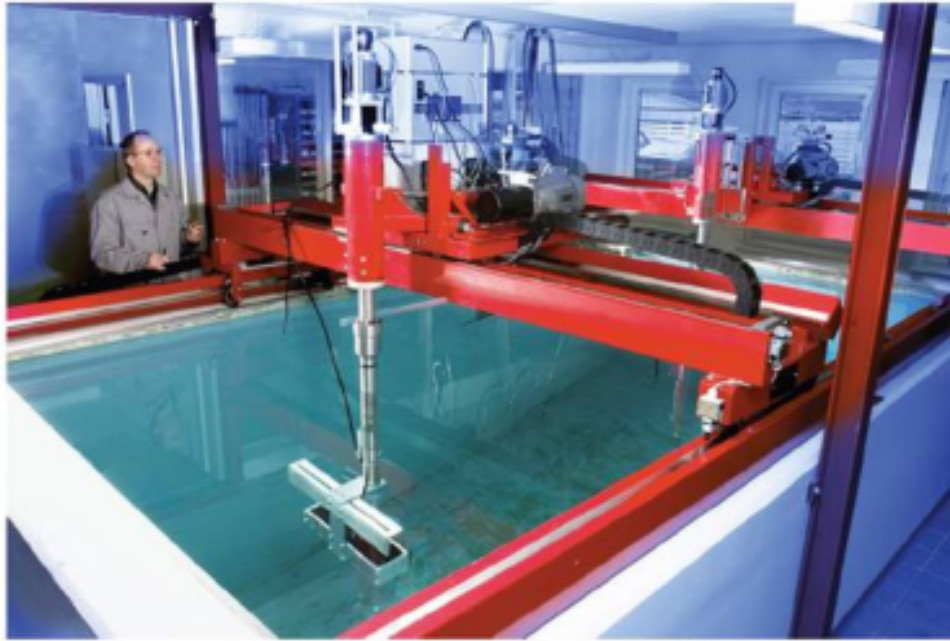


图：以 TC4033-1 为例的阻抗汇总曲线——陶瓷最低共振约在 90 kHz（虚线圈出处），80 kHz 以下完全处于非共振工作状态；其 OCR 曲线在约 100 kHz 的反共振点处达到峰值

1.2 RESON 的声学校准设施

RESON A/S 的声学校准水池长 4.5 m、宽 3 m、深 2.5 m，池壁为混凝土实体结构（未加装吸声材料）。校准采用门控（脉冲选通）测量技术来消除池壁反射的影响。为了让门控技术有效工作，发射脉冲必须小于约 2.5 ms——脉冲过长会被池壁反射并与参考发射器发出的直达信号相互干涉。校准设施的转台小车可承载重达 130 kg 的声呐头。





Complete calibration test facility at RESON in Denmark

图 1：位于丹麦 RESON 的完整声学校准测试设施——采用门控测量技术消除池壁反射影响

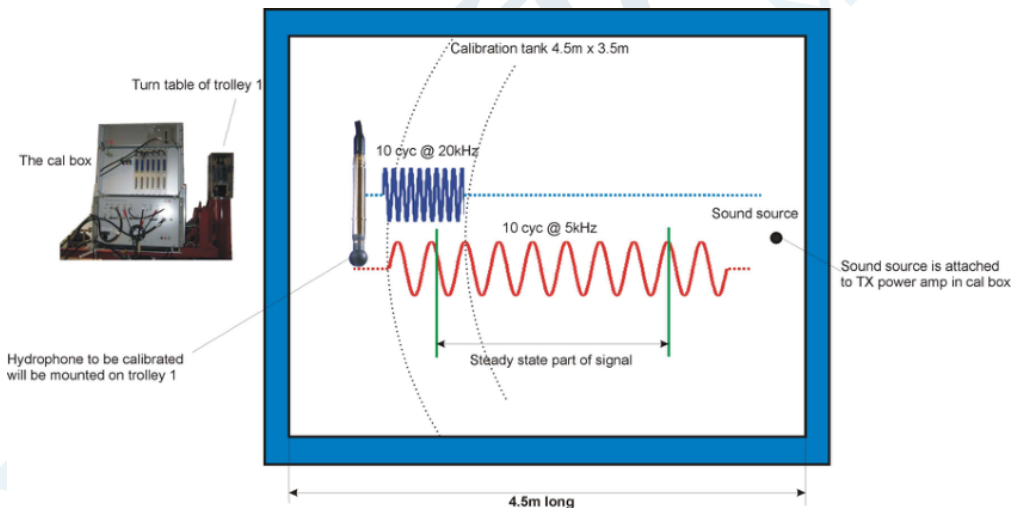


图 2：校准水池示意。红色脉冲为 2 ms 长、5 kHz 共 10 个周期；蓝色为 20 kHz 共 10 个周期，脉冲长度与水池尺寸按比例绘制

声波从声源（发射器）以球面波形式扩散传播（图中黑色虚线）。打到池壁的声波会改变方向反射；若脉冲过长，反射波将与声源到被校水听器之间直达路径上的声波发生干涉。

“门”是放置在脉冲中的一个时间窗，测量在该时间窗内完成。要获得可靠测量，发射端（发射器加功放）与接收水听器的响应都必须达到稳态。当频率远低于 5 kHz 时，受消除反射所需的短脉冲（ ≤ 2.5 ms）限制，脉冲内只含极少的周期，稳态响应无法建立，在校准水池中难以获得可靠测量。能否达到稳态，很大程度上取决于参考发射器与被校水听器自身的特性。

RESON 校准水池声学测量可达到的不确定度如下：



频率范围	测量值不确定度
2 - 5 kHz	± 1.8 dB
5 - 20 kHz	± 0.8 dB
20 - 500 kHz	± 0.7 dB
500 kHz 以上	± 1.3 dB

校准数据存入数据库，通过唯一序列号标识各个传感元件（换能器、水听器）以及多波束声呐的阵列组件。数据可从校准数据库中导出至 Excel。

为填补 5 kHz 以下的空白，RESON 采用活塞发声器（Pistonphone）测量来对水听器进行验证和校准。

1.3 250 Hz 活塞发声器校准

活塞发声器校准的原理相当简单，校准在低频（通常 250 Hz）下进行，声源基于固定位移的振荡活塞。水听器置于一个称为活塞发声器耦合腔的小型密闭容器中，容器有两个进/出口：活塞式声源（B&K; 4223 / 4229 型，或 G.R.A.S. 42AA 型）接在进口，可选配一只经过校准的传声器和声级计（如 B&K; 2239 型）接在出口。选配传声器用于精确测量容器内的声压级。将校准传声器测得的声压级与水听器的输出电压联系起来，即可以很高的精度算出水听器在 250 Hz 下的 OCR（接收灵敏度）。

在 TL8089（TC4032 专用活塞发声器耦合腔）中，插入 TC4032 后的典型声压级：

- G.R.A.S. 42AA 型活塞发声器：SPL 138 dB re 1 μ Pa
- B&K; 4223 / 4229 型校准器：SPL 156 dB re 1 μ Pa
- 精度： ± 0.3 dB（相对于水听器标称体积）

注意：耦合腔的设计使传感元件周围的空气腔尽可能均匀，以保证良好有效的耦合，使水听器响应能够代表自由场响应。活塞发声器校准利用了一个事实：在低频（含 250 Hz）下，空气与水听器传感元件之间的耦合，与水听器传感元件同水之间的耦合基本一致。因此可以在空气中用简单得多的装置完成有效校准。活塞发声器灵敏度在校准曲线上以 PHO @ 250Hz 的数值表示。



图 3: G.R.A.S. 活塞声源与 TC4032 专用 RESON 活塞发声器耦合腔 TL8089



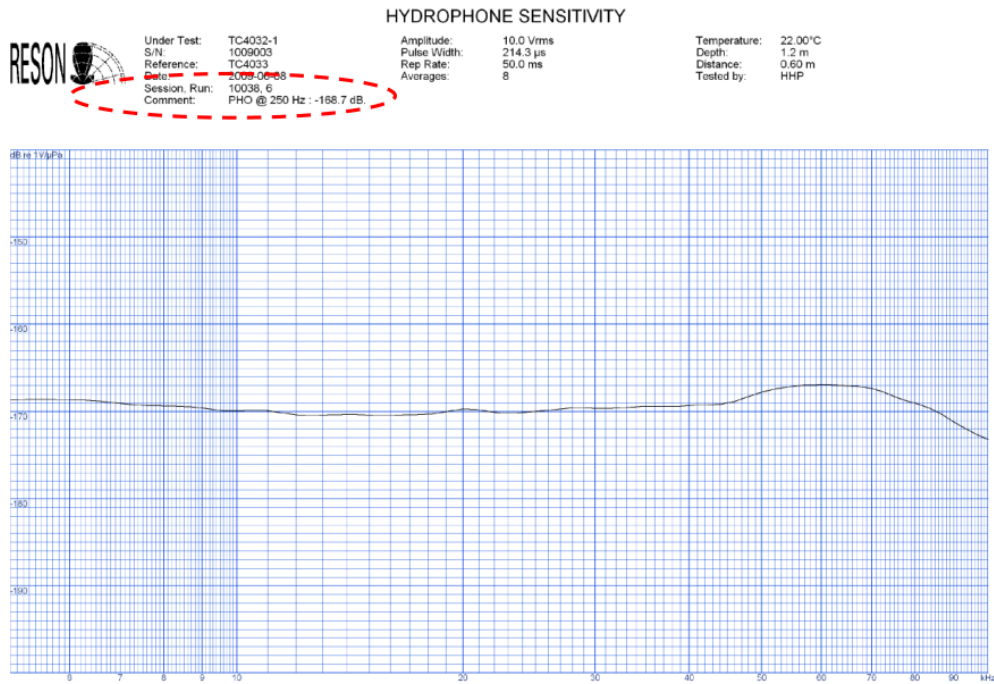


图 4：活塞发声器校准装置示意——TC4032

安装在耦合腔内，耦合腔（阴影区）为小型密闭容器，与声源、水听器及测量腔内声压的参考传声器配合

1.4 带 PHO 值的校准曲线图（Cal 图）

出厂校准图上，250 Hz 处的接收灵敏度以“PHO @ 250Hz”标注（例如 -168.7 dB re 1V/μPa，图中红圈处）。客户默认收到的即为该校准图：PHO @ 250Hz 是活塞发声器装置测得的 OCR 值，水听器的 OCR 曲线在 250 Hz 处应对中以该 PHO 值。

1.5 0 Hz – 5 kHz 区间的数据插值

0 Hz 至 5 kHz 之间任意频率 f 的 OCR，由 250 Hz 处的 PHO 值和水池中实测的 5 kHz OCR 值共同确定。若 250 Hz 灵敏度与 5 kHz 灵敏度在校准允差范围内吻合，即可用线性插值估算两者之间的数据点。插值之所以成立，正是基于水听器设计所保证的线性：

$$\text{OCR}(f) = \text{OCR}(5\text{kHz}) + [\text{PHO}(250\text{Hz}) - \text{OCR}(5\text{kHz})] \times (5\text{kHz} - f) / (5\text{kHz} - 250\text{Hz})$$

注意：高通滤波器会改变滤波点以下的响应。

