

Tech Note 10: RESON 水听器的平均无故障时间 (MTBF)

基于 TC4032 / TC4042 实际交付与返修数据的可靠性分析

Mean Time Between Failures (MTBF) for RESON Hydrophones TC4032, TC4042

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。



概述

本文讨论 RESON 全系列水听器 (含内置与无内置前置放大器型号) 的平均无故障时间 (MTBF)。分析基于两款量产 (COTS) 型号: TC4042——球形全向水听器, 内置前置放大器, 传感头以丁腈橡胶 (NBR) 包覆, 外壳为海青铜; TC4032——低噪声“零级海况”级水听器, 内置前置放大器, 传感头同样为 NBR 橡胶包覆, 外壳同为海青铜。

基于实际返修数据的 MTBF

获取“真实世界”MTBF 的最初思路, 是统计 TC4032 与 TC4042 历年的实际 RMA (返修) 案例: 将历年交付的水听器数量乘以各自的服役时间求和, 再与返修回来的数量比较。返修机的服役时间为交付日期到返修回厂日期之间的时长。

$$\text{MTBF} = [\Sigma(\text{非返修机数量} \times \text{交付至今天数}) + \Sigma(\text{返修机数量} \times \text{交付至返修天数})] \div \text{返修案例总数}$$

- “非返修机”指尚未返厂的水听器;
- “交付日期”指水听器实际发货给客户的日期;
- 返修机的服役寿命 = 返修回厂日期 - 原始交付日期。

TC4032 于 1997 年首次交付, TC4042 于 2000 年首次交付。历年来返修率为 5.5%——其中部分返修仅为重新校准, 并非故障; 个别返修机因接插件松动导致进水。

按上述“交付量 vs 返修量”的初步算法, TC4032/TC4042 的 MTBF 超过 57 年 (该数字还剔除了 2000 年之前的早期产品, 若计入会更高)。虽然“57 年”不应被理解为水听器的预期寿命, 但它确实表明了产品的稳健性——发生故障的可能性非常低。不过, 这一结果只能作为稳健性的佐证, 不能单独作为 MTBF 指标。

1. 水听器的结构组成

1.1 NBR 橡胶声学窗 (TC4032 / TC4042 传感元件包覆层)

TC4042 与 TC4032 均采用 NBR 橡胶整体包覆, 该材料水渗透率极低, 并兼具良好的抗紫外、抗臭氧、抗污染物和耐机械磨损性能。

RESON 所有带硫化橡胶声学窗的标准量产水听器均使用这一特制配方 NBR, 其水渗透率为 1.3×10^{-9} $\text{H}_2\text{O} \cdot \text{cm}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$ ——与公认为渗透率最优材料之一的丁基橡胶非常接近 (丁基橡胶约为 1.2×10^{-9} , 引自《Handbook of Sonar Transducer Passive Materials, NRL》)。该数据是 RESON 在 2004/2005 年将氯丁橡胶替换为 NBR 时实测获得的。

所用 NBR 首先耐海水和淡水, 也耐油; 对汽油耐性有限, 对多数酸耐性有限; 会被碱、强酸、卤代烃 (四氯化碳、三氯乙烯)、硝基烃 (硝基苯、苯胺)、磷酸酯液压油、酮类 (MEK、丙酮)、臭



氧和汽车制动液破坏。

RESON 校准水池中用于声学校准的参考水听器长期浸没在水中，以下各机已高强度使用多年：

型号	序列号	制造年份
TC4033-1	601010	1997
TC4033-1	4204018	2004
TC4033-1	3306108	2006
TC4034-1	0200023	2000
TC4034-1	4402077	2001

上述水听器每两年送英国国家物理实验室（NPL）重新校准一次，历次校准结果始终非常接近且一致。这些 TC4033/TC4034 与 TC4032/TC4042 采用相同的包覆工艺——我们特别指出校准设施自用机的表现，正是因为它证明了产品的耐久性、稳定性与可靠性：这些水听器每天高强度使用，且绝大部分时间浸没在水中。

1.2 压电陶瓷

传感元件所用压电陶瓷会随时间老化，但老化速度在出厂后最初几周便迅速下降，此后老化不再是水听器寿命期内的实际问题。RESON 所有水听器均使用经过老化处理的陶瓷。

过高的机械应力会导致压电陶瓷损坏或性能退化，各型号的生存深度与工作深度指标见各自数据手册：TC4032 生存深度 700 m、工作深度 600 m；TC4042 生存深度 1200 m、工作深度 1000 m。

对压电陶瓷唯一真正的威胁是水——并非水直接侵蚀陶瓷本身，而是陶瓷表面的银电极会受水腐蚀。包覆层正是针对这一点的防护。

1.3 前置放大器

TC4042 与 TC4032 均内置前置放大器。TC4042 所用前置放大器同时也是 TC4037 水听器的配件产品 EC6063。EC6063 前置放大器与 TC4042 水听器均为 2000 年推出；TC4032（含前置放大器）则自 1997 年首次交付。极低的返修数量表明前置放大器具有良好的稳定性。

2. 结论

在正常使用和妥善维护的前提下，RESON 水听器 10 – 15 年的服役/工作寿命是现实的。水动力载荷、粗暴操作、紫外曝晒以及接触某些化学品会缩短寿命，但总体而言 RESON 水听器非常坚固，完全为海洋环境使用而设计。

对于采用 RESON 水听器的大型应用，MTBF 计算可按 7 – 10 年服役寿命取值，在此期间发生故障的概率非常低。



采用 PUR（聚氨酯）透声面的水听器寿命较短，因为 PUR 的渗透率更高——例如 TC4035、TC4038，预期服役寿命为 3 – 5 年。具体型号所用材料请查阅相应产品数据手册。

原文作者：Tom Mortensen，RESON 集团传感器产品线经理（PLM Sensors）。

