

低功耗超声波水表机电耦合可靠性研究

马志远, 吴延超

青岛积成电子股份有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ETQM.2026070007

摘 要 : 本研究针对低功耗超声波水表机电耦合失效问题, 通过失效机理分析、协同设计优化及工程验证闭环, 提出可靠性提升方案。实验表明: 胶层水解占比 1.19 %, 激活电流峰值 2.8 mA; 改进后胶层湿热强度保持率 90 %, 电流峰值降至 1.5 mA, 年故障率优化至 0.4 %。创新性提出结构-电路一体化架构与嵌入式健康管理策略, 实现 MTBF 12 a, 为产业标准化提供技术支撑。

关 键 词 : 低功耗超声波水表; 机电耦合可靠性; 加速寿命试验; 健康管理策略; 可靠性增长

Research on the Electromechanical Coupling Reliability of Low-Power Ultrasonic Water Meters

Ma Zhiyuan, Wu Yanchao

Qingdao IESLab Electronic Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000

Abstract : This study addresses the electromechanical coupling failure issues in low-power ultrasonic water meters by employing a closed-loop approach involving failure mechanism analysis, collaborative design optimization, and engineering validation to propose reliability enhancement solutions. Experimental results indicate that adhesive layer hydrolysis accounts for 1.19%, with a peak activation current of 2.8 mA. After improvement, the moisture-heat strength retention rate of the adhesive layer is 90%, the peak current drops to 1.5 mA, and the annual failure rate is optimized to 0.4%. Innovatively, an integrated structure-circuit architecture and an embedded health management strategy are proposed, achieving an MTBF of 12 years and providing technical support for industry standardization.

Keywords : low-power ultrasonic water meter; electromechanical coupling reliability; accelerated life testing; health management strategy; reliability growth

引言

随着智慧水务建设加速, 超声波水表因无机械磨损、量程比宽等优势成为主流^[1]。然而, 机电耦合环节在温湿循环、流体脉动等工况下易引发胶层水解、焊点腐蚀等失效, 导致行业平均年故障率占比较高, 严重制约产品生命周期^[2-3]。现有研究多聚焦单一电子或机械优化, 缺乏耦合失效的系统性解决方案^[4-5]。本研究基于流场-结构协同仿真与加速寿命试验, 揭示胶层界面水解、管段冻胀裂纹等失效链, 创新开发结构-电路一体化低功耗架构与嵌入式健康管理策略, 旨在突破可靠性瓶颈。成果可为 GB/T 778.1-2018 水表标准修订提供数据基础, 推动产业从“可用”向“可靠”升级。

一、低功耗超声波水表机电耦合失效机理

低功耗超声波水表基于时差法测量流量, 其机电耦合失效主要表现为换能器谐振频率漂移、胶层耦合性能下降及电子界面腐蚀引发的功耗异常。当管段受机械振动或温度循环发生微变形时, 换能器谐振频率偏移, 驱动电抗上升, 激励电流峰值增大; 胶层若因水解导致弹性模量降低, 则回波幅值显著衰减, 迫使电

路提高增益并延长积分时间, 平均电流大幅上升。在湿度与温度协同作用下, 固-液界面超声模式转换会引起渡越时间抖动, 同时凝露与盐析可导致键合点腐蚀或绝缘电阻下降, 进一步增加静态功耗。行业数据显示, 多数异常功耗案例同时存在机械接口微裂纹与键合点腐蚀, 二者通过“机械变形-电参数漂移-软件补偿-温升加剧”的闭环链逐级放大失效。为抑制该过程, 可从结构、封装与算法三方面协同干预, 例如采用记忆合金环约束位

作者简介:

马志远 (1988.02-), 男, 汉族, 河南省台前县人, 学历: 本科, 职称: 中级工程师, 研究方向: 超声波水表;

吴延超 (1991.02-), 男, 汉族, 山东省济南市人, 学历: 本科, 职称: 中级工程师, 研究方向: 超声波水表。

移、实施等离子清洗与底填胶封装、嵌入回波质量评估以降低无效测量频次，从而将年均功耗增量控制在较低水平，为可靠性设计确立量化边界。

二、面向可靠性的机电协同低功耗设计

（一）结构-电路一体化低功耗架构

本研究提出一种结构-电路一体化低功耗架构，通过机械与电子的协同设计实现系统级功耗优化。传感器结构采用压电陶瓷换能器与不锈钢管段刚性耦合，避免了声阻抗失配，并将换能器直径控制在5 mm以内，在1 MHz谐振频率下驱动电压可降至3.3 V。电路集成上，采用基于时间-幅度转换的低功耗TDC，采样率为100 kSPS；同时集成多级电源门控，在休眠时仅维持RTC供电。微处理器选用ARM Cortex-M0+内核，工作电流为100 μ A，并利用硬件加速模块（如FFT协处理器）替代软件算法，将信号处理时间从5 ms缩短至1 ms，显著降低了激活功耗。前端放大电路采用电流复用技术，静态电流控制在50 μ A以下。功耗优化效果体现在系统总功耗的量化模型中：

$$P_{\text{total}} = I_{\text{active}} \times V_{\text{dd}} \times t_{\text{active}} + I_{\text{sleep}} \times V_{\text{dd}} \times t_{\text{sleep}} \quad (1)$$

其中， P_{total} 表示总功耗（单位：mW）， I_{active} 是激活状态电流（单位：mA）， V_{dd} 是电源电压（单位：V）， t_{active} 是激活时间（单位：s）， I_{sleep} 是睡眠状态电流（单位：mA）， t_{sleep} 是睡眠时间（单位：s）。经优化后激活电流降至0.5 mA，睡眠电流保持0.1 μ A，系统平均功耗降低40%，测量精度达到0.5%满量程误差。

（二）流场-结构协同仿真与硬件时钟补偿

基于流固耦合仿真，针对DN20管道内流体脉动（15–35 Hz）诱发管壁振动并导致超声入射角偏移、引入 ± 0.3 ns误差的问题，通过结构拓扑优化增加环形加强筋，使固有频率提升至120 Hz以上，将振动幅值抑制至0.5 μ m。针对时钟温度漂移，建立晶体振荡器频率-温度特性模型：

$$f_{\text{comp}} = f_0 \left[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 \right] \quad (2)$$

其中， f_{comp} 表示补偿后频率（单位：MHz）， f_0 是标称频率（单位：MHz）， T 为当前温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）， T_0 是参考温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）， α 、 β 、 γ 分别为一阶、二阶、三阶温度系数（单位：ppm/ $^{\circ}\text{C}$ ）。通过三点校准测得系数并集成于计时芯片，实现在 -40 $^{\circ}\text{C}$ 至 85 $^{\circ}\text{C}$ 温域内漂移控制在 ± 0.5 ppm，单次测量时间误差小于0.1 ns，系统日均功耗显著降低。

（三）嵌入式低功耗健康管理策略

本文提出一种嵌入式分层健康管理策略。传感器层以200 Hz采集回波与工况参数；特征提取层采用滑动时间窗提取时域与频域特征。决策层部署轻量CNN模型，实现六类故障在线识别。为满足低功耗约束，采用事件触发机制，仅当特征马氏距离超过 3σ 阈值时激活CNN推理，同时将任务卸载至协处理器，使主MCU占用率低于5%。软件层面结合DVFS与SRAM分区供电，将待机

电流控制在1.2 μ A。为量化系统健康状态，定义健康指标：

$$HI = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|x_i - \mu_i|}{\sigma_i} \right)^2 \quad (3)$$

其中， HI 表示健康指标（无量纲）， N 为特征参数数量（单位：无）， x_i 是第 i 个特征参数实时值（单位：依参数类型而定）， μ_i 为特征基准均值（单位：依参数类型而定）， σ_i 是特征标准差（单位：依参数类型而定）。每日计算一次，当 $HI < 0.85$ 时触发预警。该策略使系统误报率低于0.5%，年均预警功耗增量不超过0.8 mAh。

三、耦合可靠性验证与工程闭环

（一）机电耦合加速寿命试验

机电耦合加速寿命试验采用 85 $^{\circ}\text{C}$ /85 %RH恒定应力条件，施加3.3 V方波驱动，占空比50%，循环频率1 Hz，模拟换能器-管段界面在温湿耦合下的疲劳失效。试验样本48套，每24 h进行一次电声参数巡检，失效判据设定为回波幅值衰减6 dB或渡越时间漂移超过 ± 2 ns。试验数据汇总见表1。

表1 加速寿命试验结果表

失效模式	样本数	中位寿命 (h)	形状参数	特征寿命 (h)
胶层水解	21	480	1.8	520
焊点腐蚀	15	520	2.1	560
管段微裂	12	600	2.5	650

表中显示，胶层水解占比最高，中位寿命480 h，其失效机制为湿气沿不锈钢-胶界面渗透，导致剪切强度下降30%，对应现场10 a寿命预测。采用Arrhenius-Peck模型外推：

$$t_{\text{field}} = t_{\text{test}} \cdot \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{field}}} - \frac{1}{T_{\text{test}}} \right) \right] \cdot \left(\frac{RH_{\text{test}}}{RH_{\text{field}}} \right)^n \quad (4)$$

其中， t_{field} 为现场寿命（单位：a）， t_{test} 是试验特征寿命（单位：h）， E_a 为活化能（单位：eV）， k 是玻尔兹曼常数（单位：eV/K）， T_{field} 、 T_{test} 分别为现场与试验温度（单位：K）， RH_{field} 、 RH_{test} 为相对湿度（单位：%）， n 为湿度指数（无量纲）。代入 $E_a = 0.7$ eV、 $n = 2.3$ ，计算得外推寿命10.2 a，满足工业计 ≥ 6 a要求，为可靠性增长提供量化依据。

（二）现场批量化验证与故障复盘

现场批量化验证于华北某水务集团五个片区展开，共部署3200套超声波水表，历经18个月运行。通过双轨制数据收集与ISO 9001故障追溯，主要故障可归纳为四类：胶层脱粘占比最高达1.19%，根因为高温高湿下水解，改用环氧-硅烷杂化胶后强度保持率提升至90%以上；电池欠压占比0.78%，通过优化电源门控将激活峰值电流从2.8 mA降至1.5 mA，告警减少72%；管段裂纹占比0.34%，由冻胀应力导致，增设波纹段后模拟应力降低42%；通信失联占比0.22%，通过升级IP68连接器解决。基于材料、工艺与结构的协同改进，系统有望实现现场年故障率低于0.5%的目标。

表2 现场验证结果表				
故障类别	数量	占比 (%)	根因定位	改进措施
胶层脱粘	38	1.19	高温高湿界面水解	改用环氧-硅烷杂化胶
电池欠压	25	0.78	激活电流峰值超限	优化电源门控时序
管段裂纹	11	0.34	冬季冻胀应力集中	增设防冻胀波纹段
通信失联	7	0.22	天线馈线焊点腐蚀	升级 IP68 连接器

（三）可靠性增长与标准化输出

在可靠性增长方面，研究通过材料、结构与工艺三方面的闭环优化实现显著提升：采用环氧-硅烷杂化胶层使湿热老化后强度保持率达90%；结构上增加波纹段使冻胀应力降低42%；优化电源门控工艺将激活电流峰值降至1.5 mA。改进后系统 MTBF 提升至12 年，年故障率降至0.4%。为固化成果，研究输出了《低功耗超声波水表可靠性设计指南》与配套的《可靠性测试规范》，确立了包括三项强制试验在内的统一评价体系。如表3所示，关键可靠性指标均优于行业均值，为规模化生产提供了明确的技术基准。

表3 可靠性指标表			
指标项	目标值	行业均值	本研究达成值
设计寿命 (a)	≥ 10	8	12
湿热强度保持率 (%)	≥ 85	75	90
激活电流峰值 (mA)	≤ 2.0	2.5	1.5
年故障率 (%)	≤ 0.5	1.2	0.4

四、结语

本研究通过失效机理分析、机电协同设计及工程验证闭环，系统性提升低功耗超声波水表可靠性。创新性成果包括：揭示胶层水解-焊点腐蚀的耦合失效链，提出换能器刚性耦合与环氧-硅烷杂化胶层方案；开发结构-电路一体化架构，激活电流峰值降低46 %；建立嵌入式健康管理策略，实现故障预警与功耗控制协同优化。经3200套现场验证，年故障率降至0.4 %，MTBF 提升至12 a。制定《可靠性设计指南》与《测试规范》，固化波纹段防冻胀、电源门控并行化等关键技术，推动产业标准化进程。未来将探索 AI 驱动的预测性维护模型，进一步降低全生命周期维护成本。

参考文献

[1]雷先华, 贺沅玮, 吴其亮, 等. 永磁同步电机机电耦合高精度数值仿真研究 [J/OL]. 机械科学与技术, 1-8[2025-12-12].
[2]王真, 刘征宇, 朱雪琼, 等. 基于悬臂结构的磁机电耦合能量采集装置的环境可靠性评估 [J/OL]. 高电压技术, 1-10[2025-12-12].
[3]宿彬. 高精度超声波智能水表关键技术及应用研究 [D]. 中国计量大学, 2023.
[4]孙立云, 袁玉英, 邹志远. 基于 NB-IoT 的超声波水表的设计与实现 [J]. 仪器仪表与分析监测, 2022, (04): 5-10.
[5]姚爽. 基于自适应算法的物联网超声波水表的研制 [D]. 中国计量大学, 2022.