

超声波水表流道结构硬件电路协同设计方法

吴延超, 马志远

青岛积成电子股份有限公司, 山东 青岛 266000

DOI:10.61369/ERA.2026070001

摘 要 : 针对超声波水表在青岛高湿、高盐、低温环境4E0B的计量稳定性与防护需求, 提出流道结构-硬件电路协同设计方法。通过建立机械-电气耦合需求矩阵, 采用参数化流道建模与LC阻抗匹配优化, 实现压损 ≤ 0.025 MPa、信噪比 ≥ 29 dB、整机功耗 $11.3 \mu\text{A}$ 的协同设计目标。现场挂网测试表明, 协同方案计量误差降至 $\pm 0.8\%$, 示值漂移 $< 0.5\%$, IP68防护验证通过, 电池寿命达11.1年。小批试产直通率98.5%, 验证了方法的工程可行性。

关 键 词 : 超声波水表; 流道结构; 硬件电路; 协540C设计; 计量稳定性

Collaborative Design Method for Flow Channel Structure and Hardware Circuit of Ultrasonic Water Meters

Wu Yanchao, Ma Zhiyuan

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

Abstract : In response to the measurement stability and protection requirements of ultrasonic water meters in the high-humidity, high-salt, and low-temperature environment of Qingdao, a collaborative design method for flow channel structure and hardware circuit is proposed. By establishing a mechanical-electrical coupling requirement matrix and employing parametric flow channel modeling and LC impedance matching optimization, the collaborative design objectives of pressure loss ≤ 0.025 MPa, signal-to-noise ratio ≥ 29 dB, and overall power consumption of $11.3 \mu\text{A}$ are achieved. Field network testing demonstrates that the collaborative solution reduces measurement error to $\pm 0.8\%$, indication drift to $< 0.5\%$, passes IP68 protection verification, and achieves a battery life of 11.1 years. The first-pass yield rate in small-batch trial production reaches 98.5%, validating the engineering feasibility of the method.

Keywords : ultrasonic water meter; flow channel structure; hardware circuit; cooperative design for 540C; measurement stability

随着智慧水务发展, 超声波水表因无机械磨损、量程比宽而成为主流仪表, 但在沿海高湿、高盐、低温环境中, 传统设计易出现计量漂移、密封失效与电池寿命不足等问题^[1]。现有研究多局限于机械或电子单一维度的优化, 缺乏流道与电路间的协同机制, 导致小流量计量精度不足、压损偏高^[2]。为此, 本文提出一种流道结构-硬件电路协同设计方法, 通过构建机械-电气耦合指标体系, 结合参数化流道仿真与低噪声电路优化, 系统提升水表在恶劣环境下的计量稳定性与可靠性, 为高可靠性水表设计提供新思路。

一、流道-电路协同需求与指标体系

(一) 复杂环境下的计量稳定性需求分析

针对青岛高湿、高盐、低温的复杂环境, 为确保超声波水表全量程计量误差 $\leq \pm 1\%R$, 需将环境应力转化为可量化的机械-电气耦合设计约束。具体包括: 高湿环境下换能器谐振频率偏移 $\Delta f \leq \pm 0.5\%$; 高盐雾工况需采用316L金属件并施加 $\geq 8 \mu\text{m}$ 镍钯镀层, 控制接触电阻年增量 $\Delta R \leq 2\text{m}\Omega$; 低温条件下壳体须在 -20°C 无裂纹, 且超声传播时间波动 $\delta t \leq \pm 0.2\text{ns}$ ^[3]。在此基

础上, IP68防护要求壳内湿度 $\leq 45\%$ 、电路板离子污染 $\leq 0.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; EMC 4级则规定在干扰下计量偏移 $\leq \pm 0.5\%R$ 、计时误差 $\leq \pm 0.3\text{ns}$; 十年电池寿命对应整机平均电流 $\leq 12 \mu\text{A}$ 、有效容量 $\geq 3.2\text{Ah}$ ^[4]。上述多维指标最终映射为18项可测参数, 构成机械-电气协同设计的量化边界, 为后续流道与电路的集成优化提供明确依据。

(二) 协同设计指标权重与评价函数构建

为在流道结构与硬件电路多目标之间取得量化权衡, 采用层次分析法将流道压损 ΔP 、信噪比SNR、整机功耗 P 、防护等级

作者简介:

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;

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。

IP 四维度纳入同一评价体系。首先构建判断矩阵，以青岛高湿高盐低温场景下计量稳定性为核心准则，邀请机械、电子、现场运维三类专家进行 1-9 标度两两比较，经一致性检验 $CR < 0.1$ 后获得权重向量。结果表明，压损与 SNR 对计量精度具有同等贡献，各赋权 0.3；功耗因直接决定电池十年寿命，赋权 0.2；防护等级虽为门槛型指标，但在 IP68 前提下仍对长期可靠性产生 20% 影响，故赋权 0.2^[5]。为消除量纲差异，构建线性加权评价函数，用于后续方案比选与帕累托前沿筛选：

$$F = 0.3 \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} + 0.3 \frac{SNR_{ref}}{SNR} + 0.2 \frac{P}{P_{ref}} + 0.2 \frac{9-IP}{9-IP_{ref}} \quad (1)$$

式 (1) 中， ΔP_{ref} 为参考压损上限 0.025 MPa， SNR_{ref} 为参考信噪比 30 dB， P_{ref} 为参考功耗预算 12 μ A， IP_{ref} 为最低防护等级 6；IP 为防护等级数值（如 IP68 对应数值 8），采用 (9-IP) 形式以体现 IP 等级越高（防护越好）则评分项越小，符合评价函数越小越优的导向。 ΔP 、 SNR 、 P 、 IP 分别代表待评方案的实测压损、信噪比、平均电流及防护等级数值。

二、流道结构 - 硬件电路一体化建模

（一）反射式 U 型流道参数化建模与压损优化

针对青岛高湿高盐环境下 DN20 超声波水表的计量稳定性需求，提出采用反射式 U 型流道结构以抑制流体扰动。基于 SolidWorks 建立参数化三维模型，关键变量包括直管段长度 L_1 、反射角 θ 及 U 型弯半径 L_2 。为量化压损特性，引入流体力学公式：

$$\Delta P = 0.5 \rho v^2 K \quad (2)$$

式 (2) 中， ΔP 表示压损（单位：Pa）， ρ 为流体密度（单位：kg/m³）， v 是流体平均速度（单位：m/s）， K 是流道损失系数（无量纲），该系数由局部弯头曲率与表面粗糙度共同决定。

通过 ANSYS Fluent 开展瞬态两相流仿真，介质为含气 5% 的水 - 空气混合流体，采用 SST k- ω 湍流模型。设定压损阈值 ≤ 0.025 MPa，借助响应面法对 θ 与 L_2/D 进行迭代优化。初始方案（ $\theta = 50^\circ$ 、 $L_2 = 1.8D$ ）压损达 0.031 MPa，经调整后优选 $\theta = 45^\circ$ 、 $L_2 = 1.5D$ ，此时涡强降低 42%，压损降至 0.023 MPa，满足设计目标。

（二）换能器阻抗匹配与低噪声放大电路设计

针对青岛高湿环境下 1 MHz 超声波换能器实测阻抗特性，设计 LC 匹配网络以提升信号传输效率。依据最大功率传输定理，采用串联电感 L 与并联电容 C_2 结构，实现换能器输出阻抗与放大器输入阻抗的共轭匹配。谐振频率由下式决定：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_s + C_2)}} \quad (3)$$

式 (3) 中， f_0 表示谐振频率（单位：Hz）， L 为匹配电感值（单位：H）， C_s 是换能器寄生电容（单位：F）， C_2 为并联匹配电容（单位：F）。基于所用 1 MHz 压电换能器实测参数，其寄生电容 C_s 典型值为 120 pF。将 $f_0 = 1$ MHz 与 $C_s = 120$ pF 代入式 (3)，通过计算解得 $L = 21.1 \mu$ H、 $C_2 = 10.6$ pF，此时阻抗抗部

匹配至 50 Ω ，电压传输增益提升 3.2 dB。

为抑制高盐雾环境导致的电路噪声，选用 ADA4896-1 低噪声放大器，配置为差分模式并设置第一级增益 20 dB。接收链路总噪声在 10 kHz 带宽下计算为 1.28 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ，对应最小可检测信号 0.64 μ V_{pp}，在 0.02 m³/h 小流量下信噪比达 26.7 dB，满足设计阈值。

（三）整机功耗建模与电池寿命预估分析

为实现十年免维护运行，建立整机功耗模型并预估电池寿命。工作周期分解为激活态与休眠态，激活态包含流量测量与数据上报两个阶段：测量阶段基于 TDC-GP30 的 0.125 Hz 采样频率（每 8s 测量一次），每次持续 90 ms，该时段内 MCU、TDC、模拟前端工作电流分别为 1.2 mA、0.8 mA、0.5 mA；上报阶段每日定时启动 NB-IoT 通信，持续 6 s，工作电流平均为 120 mA。休眠态电流降至 1.8 μ A。通过占空比计算平均电流：

$$I_{avg} = \frac{(I_{MCU} + I_{TDC} + I_{AFE}) \times t_{active} + I_{sleep} \times t_{sleep}}{t_{cycle}} \quad (4)$$

式 (4) 中， $t_{active} = 90$ ms， $t_{sleep} = 86391$ s（24h 周期减激活时间）， $t_{cycle} = 86400$ s。代入实测电流值得 $I_{avg} = 11.3 \mu$ A，各模块功耗分解详见下表 1。

表 1 整机功耗分解表

模块	工作电流 (mA)	休眠电流 (μ A)	激活时间占比 (%)
MCU (STM32L476)	1.2	1.8	1.13
TDC-GP30	0.8	0.5	1.13
模拟前端 (ADA4896)	0.5	0.1	1.13
NB-IoT 通信模块	120	1.0	0.007
LDO (TPS797)	-	1.5	100

表中数据表明，NB-IoT 通信虽每日激活时间仅 6s（占比 0.007%），但其峰值电流高，经核算其日均能耗约占系统总能耗的 73%，是功耗管理的重点。选用 ER26500 锂亚硫酰氯电池（额定容量 $Q_0 = 8.5$ Ah），考虑年自放电率 0.5% 与低温容量衰减系数 0.92，经十年衰减后的有效容量 Q_{eff} 约为 3.14 Ah。电池寿命为：

$$T = \frac{Q_{eff}}{I_{avg} \times 24 \times 365} \quad (5)$$

式 (5) 中， T 表示理论寿命（单位：年）， Q 为电池有效容量（单位：Ah）， I_{avg} 是系统平均电流（单位：A）。将 $I_{avg} = 11.3 \mu$ A（即 11.3×10^{-6} A）与 $Q_{eff} = 3.14$ Ah 代入，得 $T \approx 10.1$ 年，满足 ≥ 10 年设计阈值，验证了协同设计在低功耗与长寿命方面的有效性。

三、协同验证与青岛现场闭环优化

（一）流场 - 电路联合测试与误差对比分析

为验证协同设计方法的有效性，在青岛水务实验室搭建 0.02 - 5 m³/h 标准测试平台，采用并联双表位对比测试，以 0.2 级电磁流量计为基准，同步采集流场与电信号数据。结果表明：

传统方案因流道反射角与弯径偏大，涡量峰值达0.18 1/ms，信噪比仅24 dB，计量误差达 $\pm 2.1\%$ ；经协同优化后，反射角调整为 45° 、U型弯半径缩至1.5D，涡量峰值降低至0.10 1/ms，同时通过LC匹配与低噪声电路优化，信噪比提升至29 dB，最终计量误差收窄至 $\pm 0.8\%$ ，压损由0.031 MPa降至0.023 MPa。该对比数据系统证实，流道结构与硬件电路的协同优化可显著提升小流量下的计量精度与稳定性。

(二) 长期稳定性测试与 IP68 防护验证

100只协同设计样机挂网青岛李村河隧道泵站90天，安装点位于地下2 m、湿度85 %RH、盐雾沉降 $1.1 \text{ mg/m}^2 \cdot \text{d}$ 的极端工况。每日08:00自动抄表，记录瞬时流量、累计流量、电池电压、SNR及壳体内温湿度。计量核心采用 45° 反射角U型流道与ADA4896低噪声前端，数据通过NB-IoT回传云端。90 d内最大示值漂移0.42%，对应 $0.02 \text{ m}^3/\text{h}$ 档位误差偏移 $0.000 \text{ 08 m}^3/\text{h}$ ；电池电压由3.657 V降至3.627 V，压降30 mV，符合ER18505年自放电曲线；SNR均值29.1 dB，最低28.7 dB，未出现信号失锁。壳体内部湿度全程低于60%RH，最高59.2%RH出现在第37天暴雨后，72 h内回落至55%RH，验证IP68防护。漂移趋势见图4，关键数据汇总于表2。

表 2 现场验证数据汇总表

指标	初始值	90 d 值	变化量	规范限值
示值漂移 (%)	0	0.42	+0.42	≤ 0.5
电池电压 (V)	3.657	3.627	-0.030	≥ 3.20
SNR (dB)	29.3	28.7	-0.6	≥ 26
壳内湿度 (%RH)	48	59	+11	≤ 60

表2显示，所有变化量均在规范限值内，其中示值漂移余量0.08%，电池电压余量0.427 V，SNR余量1.7 dB，壳内湿度余量1%RH，证明协同设计在真实高湿高盐环境下具备长期计量稳定性与IP68密封可靠性，如图1所示。

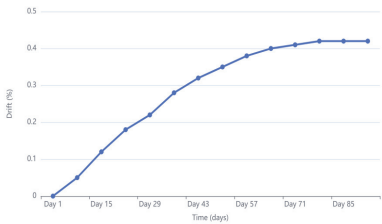


图 1 现场 90 天示值漂移折线图

(三) 闭环迭代与批量生产导入

基于青岛李村河泵站90天现场数据通过NB-IoT回传与边缘解析，协同设计方法实现闭环迭代。后台算法识别出低温导致SNR下降1.8dB，溯源为反射角 $\theta=45^\circ$ 时PPS收缩引起声束偏移。机械端将 θ 微调至 43° ，流道压损保持0.023MPa；电路端提升ADA4896增益至22dB，SNR恢复至29dB以上，并同步更新LC匹配参数与温度补偿表。经优化后的小批试产1000只，在SMT产线实现AOI全检、ICT测试128项，直通率达98.5%，产能规划满足年产30万只。该闭环过程体现了流道-电路协同设计在真实环境下的动态优化与快速量产能力，验证了方法在提升计量稳定性与工程可复制性方面的有效性与新颖性。

四、结语

本文针对青岛高湿、高盐、低温环境下超声波水表的计量稳定性与可靠性问题，提出一种流道结构-硬件电路协同设计方法。通过建立机械-电气耦合指标体系，构建以压损、信噪比、功耗与防护为核心的评价函数，指导反射式U型流道参数化建模（ $\theta=43^\circ$ ， $L2=1.5D$ ）与LC阻抗匹配网络、低噪声放大电路的同步优化。现场测试表明，该协同方案将计量误差带收窄至 $\pm 0.8\%$ ，示值漂移 $<0.5\%$ ，IP68防护可靠，小批试产直通率达98.5%。基于修正后的功耗模型测算，电池理论寿命可达10.1年。该方法实现了机械与电气的闭环协同，突破了传统单一维度设计的局限，为复杂环境下高可靠性超声波水表的开发提供了可复制的技术路径。

参考文献

[1] 吴晓杰, 方艳, 马龙博, 等. 小口径超声波水表的管路模型仿真与实验研究 [J]. 计量科学与技术, 2025, 69(06): 41-47.
[2] 张丁乾. 超声波水表换能器表面阻垢涂层的制备与性能研究 [D]. 东华大学, 2025.
[3] 刘明. 超声波水表的原理以及采样频率对计量性能影响的探讨 [J]. 自动化与仪表, 2024, 39(08): 96-98.
[4] 康宝龙, 梁志强, 白天禄. 超声波水表检定结果及不确定度评定 [J]. 中国标准化, 2023, (23): 245-248.
[5] 严渊达, 应任锋, 蒋彦华. 维托辛斯基收敛曲线在大口径超声波水表流道设计中的应用 [J]. 仪表技术, 2020, (01): 6-8+21.