

基于小信号处理方法的小口径射流电子水表设计

裘晨, 葛主泽, 王欣欣

(宁波水表股份有限公司 宁波, 315032)

摘要: 射流电子水表因其检测到的是模拟低频小信号, 其信号常被噪声电平所淹没, 以至于无法正常测量流体信息。本文从射流电子水表计量原理出发, 设计信号采集处理电路, 并结合单片机技术, 设计出一种高精度的小口径射流电子水表。该射流电子水表具有结构简单, 计量精确等特点, 同时在水质质量差的条件下也能测量, 并具有不结垢、不堵塞、自清洁等特点。

关键词: 射流电子水表 硬件电路设计 软件设计 实验分析

Design of Fluidic Oscillator type electronic water meter on the Small signal processing method

Abstract: The signal detected by Fluidic Oscillator type electronic water meter is simulated low frequency small signal, often overwhelmed with noise level, so it is difficult to measure the fluid information normally. Based on Fluidic Oscillator type electronic water meter measurement principle, this paper adopt the signal collection and processing circuit, combined with microcomputer technology, design a kind of high precision small Fluidic Oscillator type electronic water meter. The Fluidic Oscillator type electronic water meter has simple structure, precise measurement, at the same time can measure under the condition of the poor quality of the water, it also has the characteristic of no scaling, no jams, self-cleaning, etc.

Key words: Fluidic Oscillator type electronic water meter; hardware design; software design; experimental analysis

0 引言

射流电子水表是根据流体在射流腔中产生与其流速成正比的双稳态振荡, 其振荡信号反应流体流速, 射流电子水表是近年来水流量测量领域中的新产品。射流电子水表检测到的模拟低频小信号, 夹杂着很多干扰信号, 从干扰信号中提取稳定可靠的信号是射流电子水表研发的难点所在。目前国际上只有英国的 SENTEC 公司和宁波水表股份有限公司在研制射流电子水表。本文设计的射流电子水表电子控制部分以单片机控制模块 MSP430FE427 为核心, 通过带通滤波器、仪用放大器等电路来对振荡腔采集信号进行处理, 本文研发的射流电子水表具有较小的初始流量, 特别适用于在流量测量范围要求较宽的水表中。

1 小口径射流电子水表设计

本文设计的 DN-15 射流电子水表由射流传感器和电子电路控制部分组成, 其中射流传感器由射流腔、电极和磁极三部分组成。

1.1 射流电子水表计量原理

射流电子水表信号检测原理是当导电液体径流射流腔并切割由恒定磁场产生的磁力线时, 根据电磁感应定律, 就会产生感应电动势, 通过放置在与磁力线和测量通道相互垂直的一对电极, 将其检出。^[1]检出的信号通过信号处理电路后, 将其输入单片机, 并通过单片机对数据的处理, 展现给用户, 使用户非常直观的查看用水量。图 1 为射流传感器。

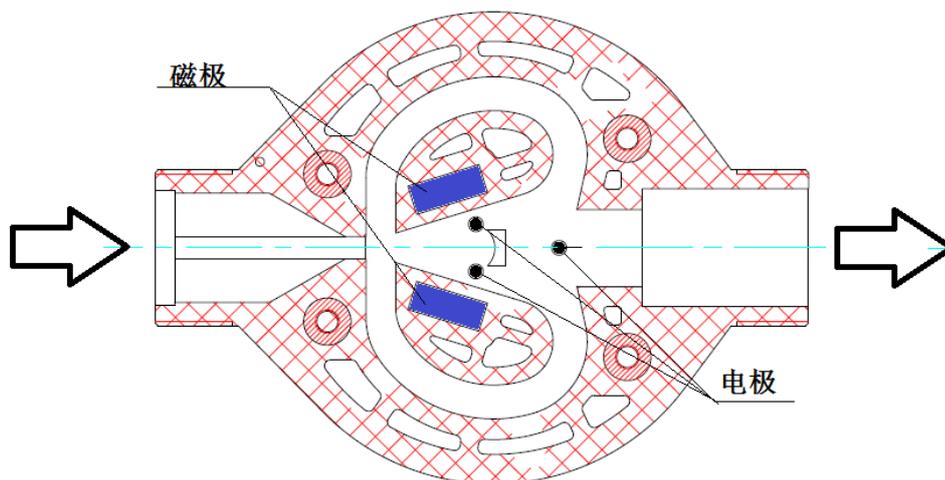


图1 射流传感器

感应电动势的幅值 $E_{\max} = kWBD \cdot \mu (\omega, f)$

式中: E_{\max} : 感应电动势; k : 流量系数; W : 权重函数; B : 磁感应强度; D : 测量通道尺寸;

$\mu (\omega, f)$: 导电液体在射流腔内流速。^[5]

1.2 射流电子水表硬件电路设计

射流电子水表因检测到的信号为微信号, 在其测量过程中会引入许多干扰, 包括恒磁励磁引入的极化干扰电动势、电化学腐蚀引入的干扰电动势、微观电化学腐蚀引入的干扰电势、流体噪声引入的干扰电势等等,^[4]如何在测量过程中, 识别信号特征, 提高信号强度, 从而进行有效抑制, 这对电子电路的硬件设计要求很高。本文以 DN-15 口径射流电子水表为例, 其采样信号带宽范围 0.08Hz~52Hz, 根据此频带范围来设计电子电路。

高精度的射流电子水表电子电路框图如图 2 所示, 主要采用模块化的设计方法, 包括单片机控制模块、信号采集处理模块、人机互换界面模块、通讯模块等。电子控制部分设计思路为: 通过信号采集处理模块, 将采集到的信号送入单片机控制模块系统, 同时将初级采样数据也送入单片机控制模块系统中, 作为唤醒源。单片机控制模块对采样数据进行分析处理, 通过人机交互界面模块, 将射流腔中的累积流量、瞬时流速等信息展现出来, 同时通过外部环境通讯模块, 将数据上传服务器。



图2 射流电子水表电子电路框图

信号采集模块是做好射流电子水表的关键所在, 也是难点之一。信号采集模块主要是为单片机模块提供有效信号, 主要解决的问题是在在噪声信号中提取有效信号, 尤其在小流量状态下, 有效信号常被噪声电平

所淹没，若将信号放大，系统噪声或者其他弱信号也同时被放大。信号采集处理模块包括调制信号驱动模块、信号放大与识别模块、后续信号处理模块三部分。

(1) 调制信号驱动模块。将电极输出的低频模拟信号，引入到 J1 端口，同时通过桥式对称电路，对两路信号进行带通滤波。同时，对电极进行反向激励，防止电极极化引入干扰。如图 3 所示，其中 R3 和 C3、R7 和 C5，R4 和 C4、R8 和 C2 分别组成带通滤波器，滤除干扰信号。同时通过 R1、R2 反向激励电极，防止电极极化。

信号发生模块，单路信号复合阻抗： $Z = R + \frac{1}{jC2\pi f}$ ，根据其采样的频率范围，计算可得 R=10K，

C=0.1~1μF。

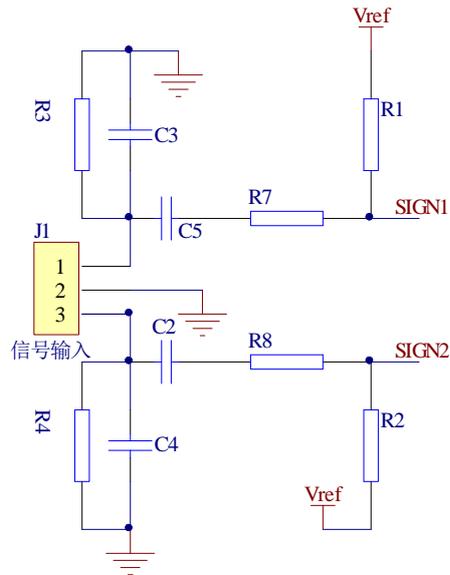


图 3 信号初级采样模块

(2) 信号放大与识别模块。经过信号发生模块后，得到的信号 SIGN1 和 SIGN2 通过仪用放大电路进行处理，采用仪用放大电路可以将共模干扰信号进行有效的消除，同时将被测差模输出信号的幅值增大一倍，其

放大增益为 $G = \frac{R_{13} + R_{14} + R_{X1}}{R_{X1}}$ ，其结构示意图如图 4 所示。[4]

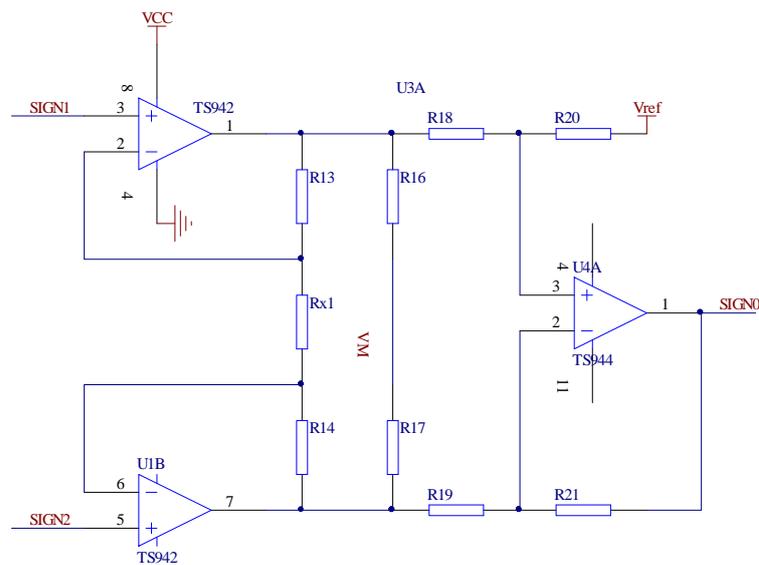


图 4 差分放大电路原理图

(3) 后续信号处理模块。鉴于信号的量级太低，信号幅值仅几到几十微伏，即使通过仪用放大电路，其所需要的量纲也不能达到要求，所以，再取两级放大，来增强信号强度。其中放大和信号处理皆用负反馈，主要是负反馈的特性所决定的，负反馈电路不但能提高放大器增益的稳定性，而且使放大器的通频带展宽，减少放大器的失真，提高放大器的信噪比。如图 5 所示。

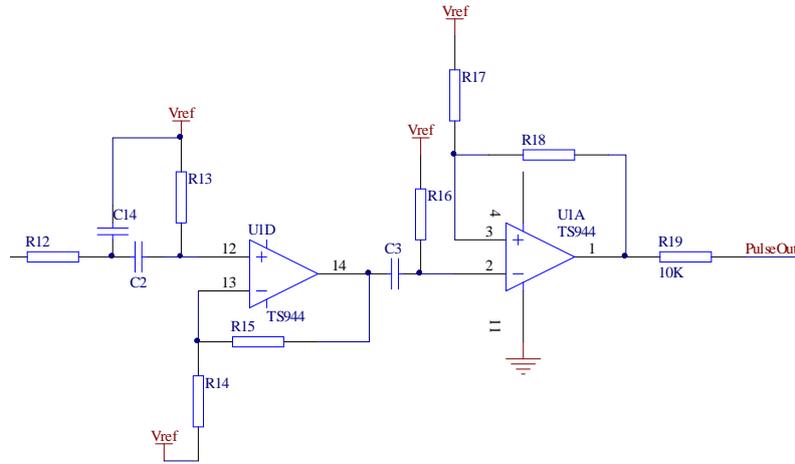


图 5 信号放大模块

1.3 射流电子水表软件设计

系统软件设计主要对电子硬件电路采集的有效信号进行进一步滤波、优化、结果显示、数据上传等。软件采用模块化的设计方法，主要包括主控程序模块、各模块初始化模块、数据存储模块、按键操作模块、显示模块、低功耗处理模块、流量测量模块、数据处理模块、数据通讯模块、中断服务模块。设计思路为：整个软件系统由中断驱动，在启动并完成系统初始化后，进入主循环，设置低功耗模式为 LPM3(仅低频外围工作)，有中断产生时，会在 ISR 中设置该中断相应的标志位并把栈上 SR 中的模式位改为活动模式，这样中断退出后就会唤醒主循环，等执行完所有的请求操作后重新进入 LPM3 低功耗休眠模式。主程序模块主要完成系统的初始化以及各模块的循环，如图 6 所示。

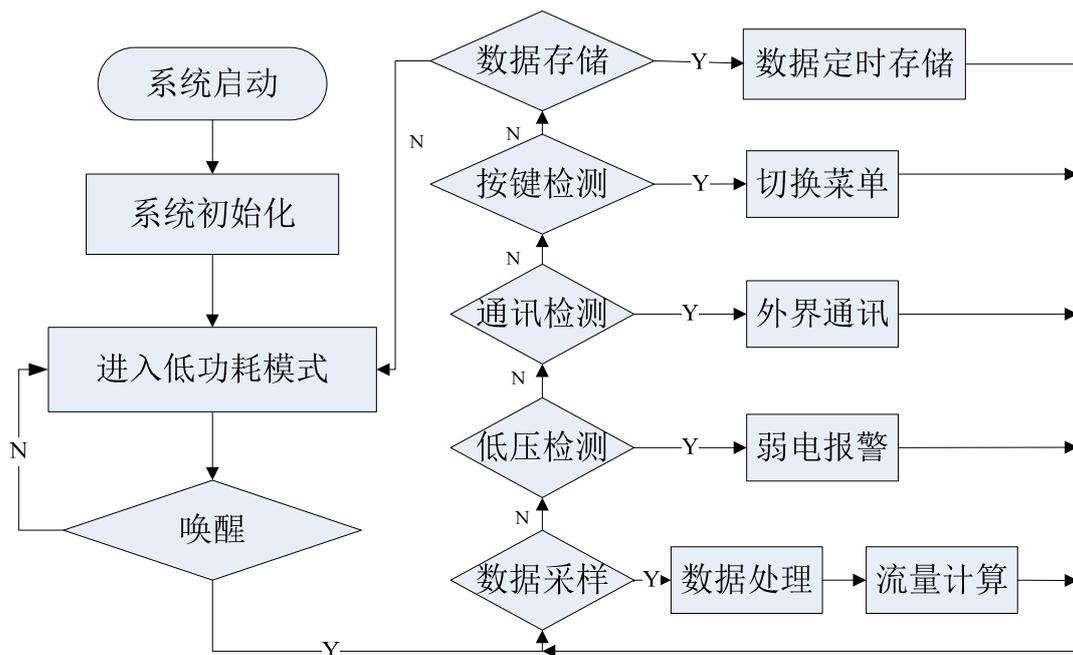


图 6 主程序模块流程图

2 实验验证

本文主要设计 DN-15 口径的射流电子水表。实验内容：检测射流电子水表在低流速和高流速时，采样信号是否稳定、可靠，并通过实流试验来查看所设计的水表是否达到计量标准并确定仪表的精度等级。

2.1 弱信号检测

在低流速和高流速下检测调制信号驱动模块、信号放大与识别模块、后续信号处理模块三大模块的信号输出。在 2500 L/h 流速下，信号处理模块信号如图 7~10 所示：



图 7 电极接入点波形



图 8 调制信号驱动模块输出波形

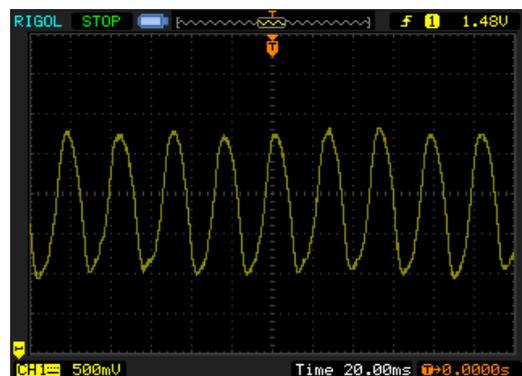
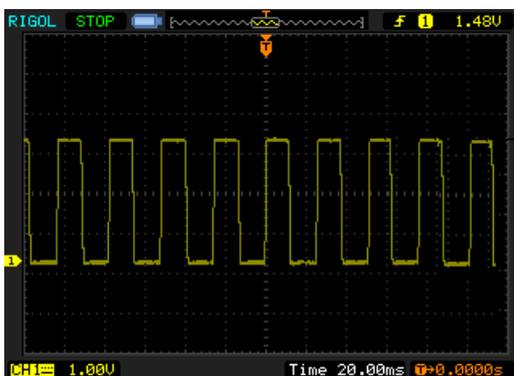


图 9 信号放大与识别模块输出波形

图 10 后续信号处理模块输出波形

在 20L/h 流速下，信号处理模块信号如图 11~14 所示：



图 11 电极接入点波形

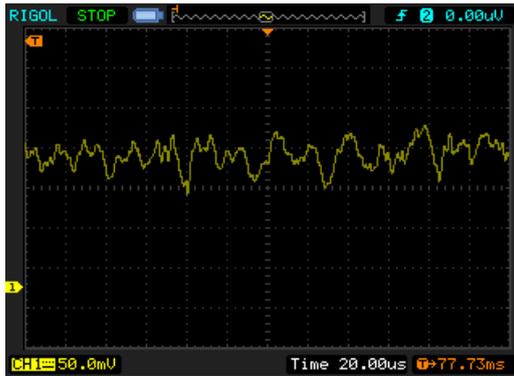


图 12 调制信号驱动模块输出波形

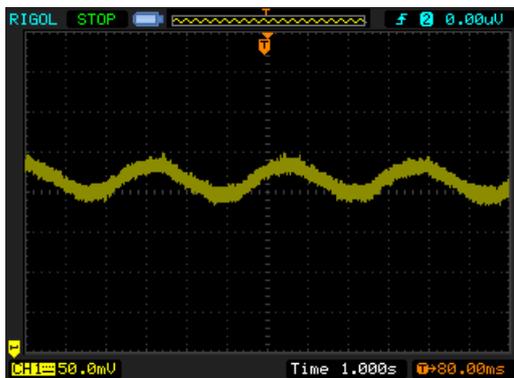


图 13 信号放大与识别模块输出波形

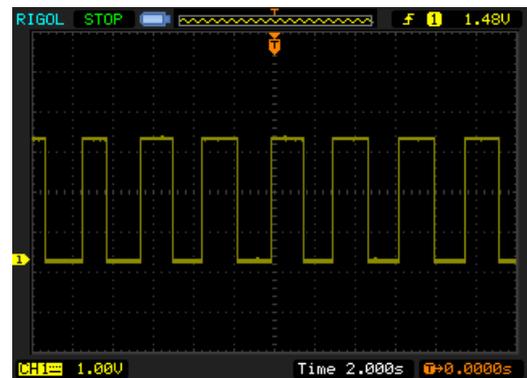


图 14 后续信号处理模块输出波形

DN-15 小口径射流水表水流流速与震荡频率之间的关系图如图 15 所示：

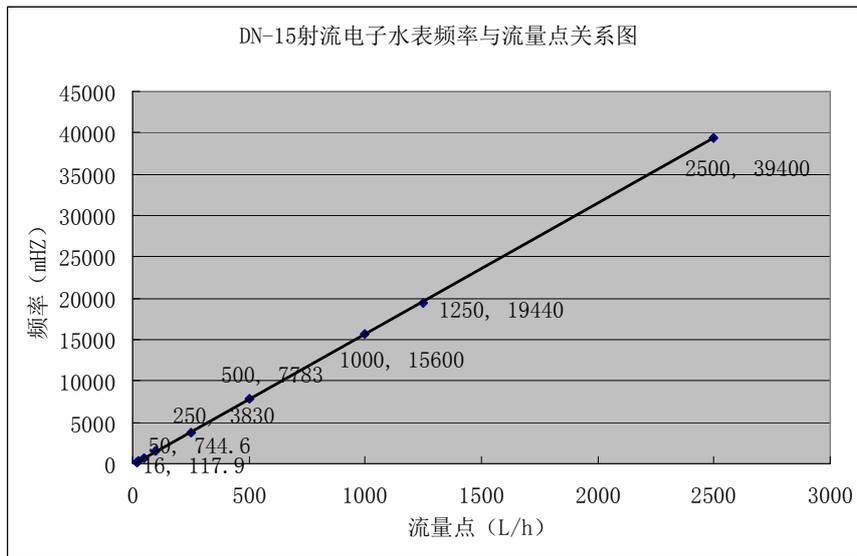


图 15 DN-15 射流电子水表频率与流量点关系图

从上述实验结果可知，通过信号采集模块所检测到的信号，是符合设计要求的。在特别小的流速状态下，采样信号会因为放大倍数等因素而漏测信号，但是经过软件处理，漏测信号只要在要求范围内，都能测量流速，将测量误差降到最低。

2.2 实流实验

实流实验主要争对各个流量点的测量误差，通过校准后，得出水表的计量等级。根据 GB/T 778.1-2007 规定，计量性能符合 5.2.3 和 5.2.4 要求：在水温 $0.1^{\circ}\text{C} \leq \text{水温} \leq 30^{\circ}\text{C}$ 时，水表的允许误差在高区 ($Q_2 \leq Q \leq Q_4$) 为 $\pm 2\%$ ，低区 ($Q_1 \leq Q < Q_2$) 为 $\pm 5\%$ 。^[2]根据 JJG 162-2007 冷水水表检定规程 5.2.1 和 5.2.2 可知，在水温 $0.1^{\circ}\text{C} \leq \text{水温} \leq 30^{\circ}\text{C}$ 时，水表的允许误差在高区 ($Q_2 \leq Q \leq Q_4$) 为 $\pm 1\%$ ，低区 ($Q_1 \leq Q < Q_2$) 为 $\pm 3\%$ 的水表为 1 级水表；水表的允许误差在高区 ($Q_2 \leq Q \leq Q_4$) 为 $\pm 2\%$ ，低区 ($Q_1 \leq Q < Q_2$) 为 $\pm 5\%$ 的水表为 2 级水表。^[3]

DN-15 口径的射流电子水表，R160 的实流流量点分别为 2500 L/h、25L/h、15.6 L/h，由表 1 可知，设计的 DN-20 超声电子水表通过参数校准后，其流量范围 R160 时，其准确度等级可达 2 级水表。

表 1 DN-20 超声电子水表流量点测量记录表

		水温: 19.5°C 水压: 0.35MPa					
流量点/(L·h ⁻¹)	第一次 测量误差 ε / %	第二次 测量误差 ε / %	第三次 测量误差 ε / %	第四次 测量误差 ε / %	第五次 测量误差 ε / %	准确度 等级	
Q3=2500	0.45	0.42	0.43	0.45	0.41		
R=160 Q2=25	1.2	1.3	1	1.2	1.1	2 级水表	
Q1=15.6	3	3.2	3.5	2.9	3.3		

3 总结

本文设计的射流电子是一种具有很大发展潜力的新型流量传感器，随着信号处理技术的不断发展和完善，射流电子水表所存在的极化干扰电势等影响正在逐步削弱和消除，而其所拥有的各种优势和特点也在同步显现，将有其更广阔的应用范围。

参考文献

- [1] 姚灵.电子水表传感与信号处理技术[M]. 北京：中国质检出版社，2012： 96~168.
- [2] 李明华，叶显仓，陈含等.GB/T 778.1-2007 封闭满管道水中流量的测量 饮用冷水水表和热水水表 第 1 部分：规范[S].北京：中国标准出版社，2008.
- [3] 詹志杰，赵建亮，张立谦，等.JJG 162-2007 冷水水表检定规程[S].北京：中国计量出版社，2012.
- [4] 梅玉芳.仪表放大器及其应用问题研究[J] . 中国科技信息，2006 年.
- [5] 姚灵.户用射流热量表流量测量特性的研究[J]. 仪表技术，2011.

此文发表于《自动化与仪器仪表》，2015（2）。