



DOI: 10.13382/j.jemi.B2003192

并行激励的电磁流量计电导率测量系统研制*

周念 黄云志 杨双龙

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘要:针对现有的电磁流量计电导率测量方法测量精度低、附加激励与磁场激励分时进行,影响流量测量实时性等问题。提出一种并行激励的电磁流量计电导率测量方法,激励电路采用单路高频方波电容耦合的方式,该激励方式可与磁场激励并行激励,使得流量信号与电导率信号均可以实时测量。采用带通滤波与基于能量衰减的信号处理方法,提高了电导率测量精度和稳定性。流速实验结果表明,并行激励下可以实现电导率和流量同时测量,且在流体电导率为 $100 \mu\text{S}/\text{cm} \sim 3 \text{mS}/\text{cm}$ 的范围内测量精度可以达到 3%,水流量标定精度优于 0.5 级。

关键词: 电磁流量计;电导率测量;并行激励;高频方波电容耦合;能量衰减

中图分类号: TH814

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 470.40

Design of the electromagnetic flowmeter conductivity measurement system with parallel excitation

Zhou Nian Huang Yunzhi Yang Shuanglong

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the existing electromagnetic flowmeter conductivity measurement methods, there are problems such as low measurement accuracy, time-sharing of additional excitation and magnetic excitation, which affect the real-time flow measurement. This paper proposes a parallel excitation electromagnetic flowmeter conductivity measurement method. The single pulse square wave capacitive coupling manner is adopted in the excitation part, which can be with magnetic field excitation in parallel. The flowmeter signal and the electrical conductivity can be measured in the same time. The band-pass filter and the method based on energy attenuation are given, which improve the precision and stability of conductivity measurement. The flow velocity measurement shows that the conductivity and the flow can be measured simultaneously with parallel excitation, and the conductivity measurement is accurate to 3% within the range of $100 \mu\text{S}/\text{cm} \sim 3 \text{mS}/\text{cm}$, the flow calibration precision is better than 0.5 level.

Keywords: electromagnetic flowmeter; conductivity measurement; parallel excitation; pulsed square wave capacitive coupling; energy attenuation

0 引言

随着工业智能化的发展,电磁流量计也在朝着智能化趋势发展^[1-2],传统电磁流量计仅能测量流体体积流量功能单一,在自来水生产、生活用水运输、使用过程中,不仅需要测量水的流量,还需要实时监测水质是否达标或被污染,电导率是衡量水质的重要指标之一^[3]。除此之外,电导率还可用于区分不同介质的流体,检测流体性

质的变化如溶液浓度等。因此,在电磁流量计系统上同时实现电导率测量具有重要意义^[4]。

目前有效的方法是通过附加激励源的方式^[5]测量两电极间的等效阻抗值得到流体电导率的值。Schrag 等^[6]介绍一种附加单频激励测量流体电导率的方法。由于电磁流量计一次传感器电极间的等效模型较为复杂,单频激励不能准确地测量一定范围内的流体电导率。Rufer 等^[7]提出一种利用双频激励源求平均阻抗的方法,附加激励采用间歇性方波直流耦合的方式,实现电导率的测

收稿日期:2020-05-29 Received Date: 2020-05-29

* 基金项目:安徽省科技重大专项(18030901040)资助



量。Hencken 等^[8]利用电化学阻抗谱技术得到被测介质的电导率,在电导率 $25 \mu\text{S}/\text{cm} \sim 4 \text{mS}/\text{cm}$ 的范围内测量精度为 20%。上海大学 Cui 等^[9-10]提出基于光电池激励的快速电化学阻抗谱测量,激励源串接于电极测量回路,不会降低前级电路的输入阻抗,且提高了测量精度,在电导率为 $1.7 \mu\text{S}/\text{cm} \sim 2\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 范围内测量精度为 5%。在上述测量方法中,附加激励源与流量计磁场激励均是分时激励的^[11],电磁流量计为了保持零点稳定性一般采用低频激励^[12-14],牺牲掉一部分的动态响应性,如果电导率测量的附加激励与流量励磁激励交替进行,势必会影响零点稳定性且进一步降低流量计的动态响应性能。为此,本文提出一种可并行激励的电磁流量计电导率测量方法。

1 电导率测量方法

1.1 电导率测量原理

电导率 σ 是表示物质导电性能的物理量,溶液电导率的测量原理是依据欧姆定律测得的,将相互平行的两电极放置于被测溶液,施加交流激励,通过极板两端的电压电流值计算溶液等效电阻 R ,设极板间距为 L ,极板面积为 F ,则电导率可表示为:

$$\sigma = \frac{1}{R} \times \frac{L}{F} = \frac{1}{R} \times K \quad (1)$$

式中: K 为电导池常数,当 K 为固定值时,电导率与溶液等效电阻呈反比例关系,通过测得溶液的等效电阻 R ,即可计算出溶液的电导率。

将电磁流量计测量管道、两测量电极及被测流体看作电导池,通过附加高频方波激励的方式测量管道内流体电导率,测量回路等效模型如图 1 所示。

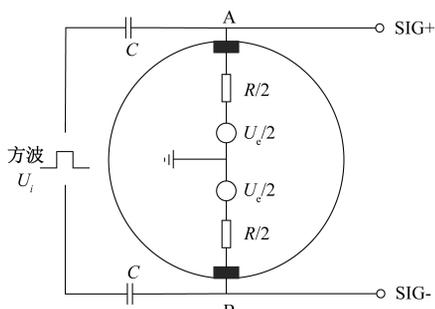


图 1 测量回路等效模型

Fig. 1 Equivalent model of electrode measurement loop

本文采用高频方波电容耦合的激励方式,A、B 表示流量传感器的两个测量电极, U_e 为由流体在磁场中运动产生的感应电动势, R 为流体等效电阻,高频方波侦测信号 U_i 通过电容 C 耦合到两电极上,电极输出信号 SIG+、

SIG-,则包含流体的流量信息和电导率信息。由于电极测量回路模型是等效对称的,使用单路高频方波侦测信号同时激励两电极,耦合后的电导率信号也是同幅值、同相位的,图 2 所示为方波侦测信号和单个电极的输出信号波形。

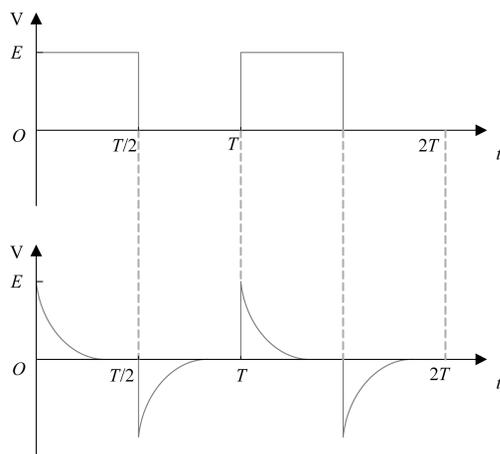


图 2 方波侦测信号和电极输出信号波形

Fig. 2 Square wave detection signal and electrode output signal waveform

图 2 中, E 和 T 分别表示高频方波侦测信号的幅值和周期,当方波信号为前半周期 ($0 \leq t < \frac{T}{2}, U_i = E$) 时,电容处于充电状态,电极输出端电压由正向峰值衰减到 0;当方波信号为后半周期 ($\frac{T}{2} \leq t \leq T, U_i = 0$) 时,电容处于放电状态,输出端电压由反向峰值衰减到 0,电容充放电的速度快慢取决于电路时间常数 τ 的大小:

$$\tau = RC \quad (2)$$

可见,电容值大小一定时,流体等效电阻的大小决定了时间常数的值,反映在输出信号波形上,即为电压减速度的快慢。根据上述回路模型和电容充放电公式,电极输出端的电压 U_o 可表示为:

$$U_o = \begin{cases} Ee^{-\frac{t}{\tau}} + U_e, & 0 \leq t < \frac{T}{2} \\ -Ee^{-\frac{t}{\tau}} + U_e, & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad (3)$$

式中: e 是自然常数,上述波形示意图中假设流量感应电动势 $U_e = 0$ 。显然,可以通过输出信号的电压计算时间常数,但电压随着时间不断变化,且易受噪声干扰,本文提出基于能量衰减法建立信号能量与等效电阻之间的关系进行电导率测量。

1.2 基于能量衰减的电导率测量方法

基于能量衰减的测量方法是通过计算一个周期内信



号的能量,求解等效电阻与信号能量之间的关系,可以有效抑制噪声干扰,其电路如图 3 所示。

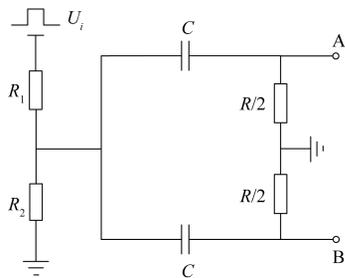


图 3 能量衰减法电路

Fig. 3 Energy attenuation circuit

图 3 中, R_1 与 R_2 为高频方波激励的分压电阻, C 为耦合电容, R 表示溶液的等效电阻值, 一个周期信号能量可表示为:

$$P = 2 \int_0^{T/2} (Ee^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt = E^2 \tau \quad (4)$$

式中: P 表示信号能量; τ 为电路的时间常数; E 表示耦合后的信号峰值。

$$E = U_i \frac{R_2 \parallel R_0}{R_1 + R_2 \parallel R_0} \quad (5)$$

式中: R_0 为电路中的等效并联电阻, 其值为 $R_0 = R/4$ 。式(5)化简后可得:

$$E = U_i \frac{R_2 R_0}{R_1 R_2 + R_1 R_0 + R_2 R_0} \quad (6)$$

电路的时间常数表达式为:

$$\tau = (R_1 \parallel R_2 + R_0) \times 2C \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(4)可得:

$$P = E^2 \tau = 2U_i^2 C \left(\frac{R_2 R_0}{R_1 R_2 + R_1 R_0 + R_2 R_0} \right)^2 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_0 \right) \quad (8)$$

由于实际的分压电阻取值为 $R_1 : R_2 = 10 : 1$, 可假设 $R_1 + R_2 = R_1$, 可得:

$$P = 2U_i^2 C \frac{R_2^2 R_0^2}{(R_0 + R_2) R_1} \quad (9)$$

可见, 能量衰减法计算结果与溶液等效电阻之间呈二次函数关系, 当溶液电阻较大时, 近似为线性关系, 用二次函数拟合输出结果与流体阻抗之间的关系。

1.3 影响因素

溶液电导率在测量过程中, 会受到很多因素的影响, 其中主要包括电容效应、极化效应和温度等。

电容效应等效模型^[15]如图 4 所示, 电解质溶液中由于离子吸附使电极表面带电, 离子整齐覆盖在电极表面, 形成离子双电层, 它由亥姆霍兹层和扩散层组成, 可等效为电容的两个极板, 是电容效应的主要来源, 称之为双电

层电容 C_x , Z_ω 表示法拉第阻抗, C_p 表示引线电容。

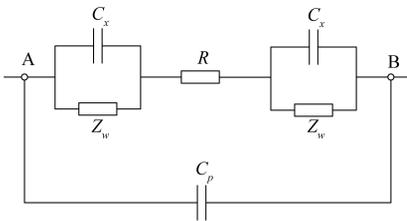


图 4 电容效应等效模型

Fig. 4 Equivalent model of capacitive effect

双电层电容与溶液电阻串联, 引线电容与溶液电阻并联。电容的阻抗 Z 与电容值大小 C 和信号频率 f 的关系如式(10)所示。

$$Z = \frac{1}{2\pi f C} \quad (10)$$

在低阻抗溶液测量时, 双电层电容容抗相较于溶液电阻不可忽略, 分压作用较明显, 可以通过增加激励频率减小电容容抗; 在高阻抗溶液测量时, 引线电容容抗不可忽略, 与溶液电阻分流较明显, 可以通过降低激励频率减小分流。所以, 在一定的合适频率范围内, 电容效应的影响可以降到最小, 相较于溶液内阻可忽略不计。

在电导率测量系统中采用直流激励或低频交流激励会产生较大的极化效应, 使溶液等效电阻增加, 对测量结果产生很大的误差。采用高频交流激励, 可以减小极化效应的影响, 激励频率越高, 极化效应的影响越小, 但过高的频率其极化减小作用微乎其微, 同时还会带来电容效应和非线性失真等问题。一般来说, 电导率测量激励频率范围为 100 Hz ~ 2 kHz^[11]。

影响电导率测量最大的外部因素是温度, 温度的变化直接影响电解质溶液的电离程度、离子的迁移速度等, 所以溶液电导率大小受温度的影响较大。通常以 25 °C 作为测量电导率的标准温度, 其他温度下需要进行温度补偿。

2 系统硬件研制

2.1 硬件方案

电磁流量计信号处理系统硬件总体框图如图 5 所示。系统以 DSP 处理器 TMS320F28335 为核心, 由励磁控制、信号调理与转换、数字信号处理与控制、通信、人机交互及电源管理等模块组成。励磁控制模块为励磁线圈提供励磁电流, 产生测量流量所需的磁场; 信号调理模块实现流量信号、励磁电流、电导率信号的采集和调理, 并通过模数转换器转换成数字信号送给 DSP 处理器; 信号处理与控制模块产生励磁控制等信号, 接收调理与转换模块发送的信号, 通过数字信号处理获得流量测量等数



据,并将其通过液晶显示、脉冲和 4~20 mA 电流等方式输出;人机交互提供按键输入和液晶显示,用于仪表信

息、工作参数的显示和设定;电源管理为整个测量系统提供所需的电源。

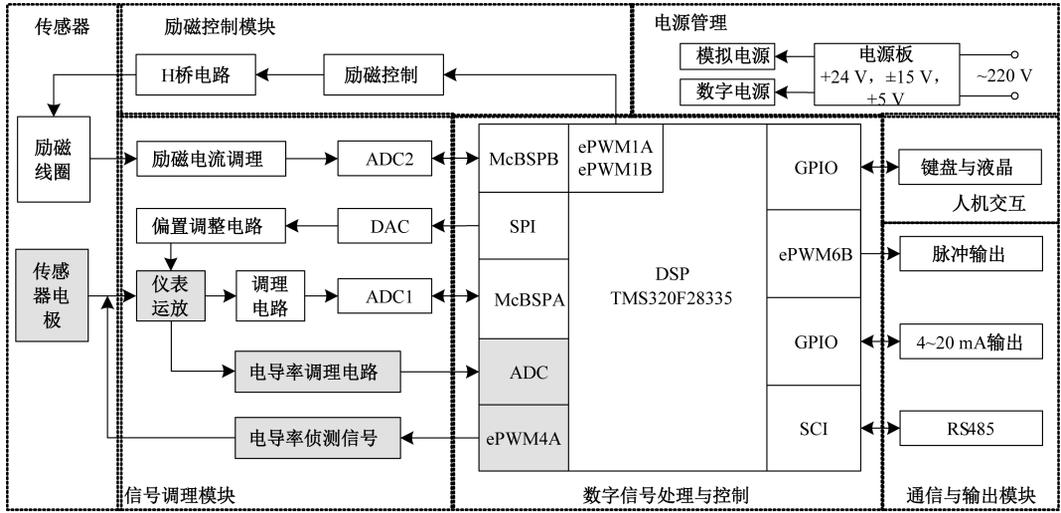


图 5 系统硬件框图

Fig. 5 Block diagram of system hardware

电导率测量部分主要由方波侦测模块、信号调理模块、数字信号处理模块等组成,方波侦测模块产生一定频率的方波侦测信号,激励被测流体产生电导率信号。仪表放大器拾取流量信号与电导率信号分别送入对应的调理电路。电导率信号调理模块采集电导率输出信号,经过调理后送入 DSP 处理器的片上 ADC。最后由数字信号处理模块完成模拟信号的采样与数字信号处理以获取

电导率结果。

2.2 激励电路设计

激励电路的功能是产生高频方波侦测信号,该侦测信号作用于被测流体,在两电极端产生感应电动势。系统采用单路高频方波侦测信号同时作用于两个电极的形式,电导率激励电路原理如图 6 所示。

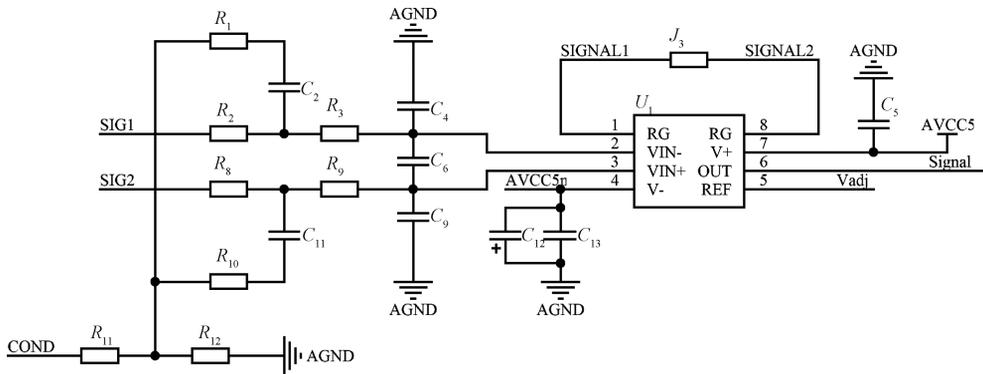


图 6 激励电路原理

Fig. 6 Schematic diagram of excitation circuit

SIG1 和 SIG2 为流量信号输入端,高频方波侦测信号 COND 由 DSP 的增强型脉宽调制器(ePWM)模块产生,分压后通过电容耦合作用于被测流体,反应在电极两端的电导率信号波形随流体阻抗的大小而变化,在器件值相等、传感器回路对称的情况下,两电极上感应信号的幅值和相位均相等,经过仪表放大器差分相减后,电导率

信号将被相互抵消,消除了对流量信号测量的影响,使并行激励的实现成为可能。采集电导率信号时为了不降低仪表放大器的输入阻抗,将信号采集点 SIGNAL1 和 SIGNAL2 设在增益电阻 J_3 两侧,同样可以获得电导率信号。



2.3 调理电路设计

调理电路的作用是对电导率信号做放大滤波处理,

滤除干扰信号,同时将信号幅值调整至 AD 采样量程范围内。图 7 所示为调理电路原理。

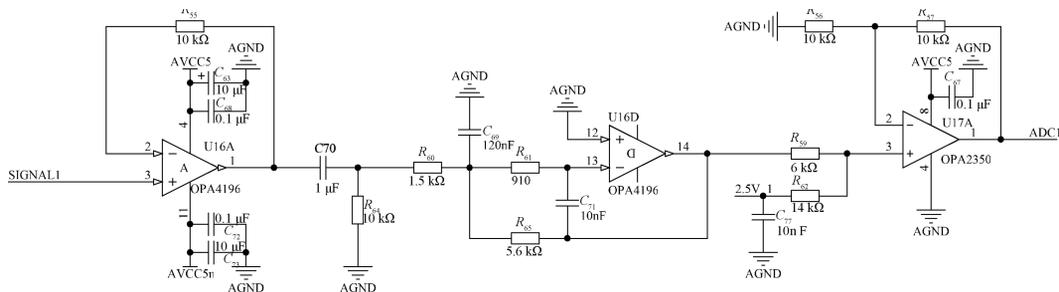


图 7 电导率信号调理电路

Fig. 7 Schematic diagram of conditioning circuit

SIGNAL1 为调理电路输入信号,第 1 级为跟随电路,起到阻抗变换的作用,运放使用的是高输入阻抗的精密运算放大器。第 2 级为高通滤波电路,作用是滤除信号中的直流分量。第 3 级为有源二阶低通滤波器,滤除信号中的高频干扰同时防止 AD 采样混叠,滤波器的设计采用 MFB 的拓扑结构,为了获得通带增益最大平坦度,选择巴特沃斯幅频响应来设计器件参数,该级电路增益可调节。最后一级为电平提升电路,由于电导率信号是双极性信号,DSP 的片上 ADC 的输入电压范围是 0~3 V,所以需要 对 信号 进行 幅 值 调 整,将 0 V 参考基准提升至以 1.5 V 为基准,充分利用 ADC 的采样精度。

电平提升电路的参考源输入为 2.5 V,通过设计运放加法与放大电路实现信号的幅值调整,该级的输入输出电压之间的关系为:

$$U_o = 1.4U_i + 1.5 \quad (11)$$

式中: U_i 为电平提升电路输入信号, U_o 调理电路输出信号。

调理电路信号的输入电压范围是 0~±200 mV,低通滤波电路设置的增益是 5 倍,则调理电路信号的输入输出关系为:

$$U_o = 7U_i + 1.5 \quad (12)$$

式中: U_i 为调理电路输入信号,信号输出以 1.5 V 为基准,幅值接近 ADC 输入量程,设计满足要求。

3 系统软件设计

电导率测量系统软件部分包括 ADC 采样、数字信号处理算法、计算结果并送显。ADC 采样部分将模拟信号转换为数字信号,算法流程如图 8 所示。

电导率信号算法处理流程为判断 AD 是否采满一周点数,满足条件则对信号进行带通滤波,滤除流量信号

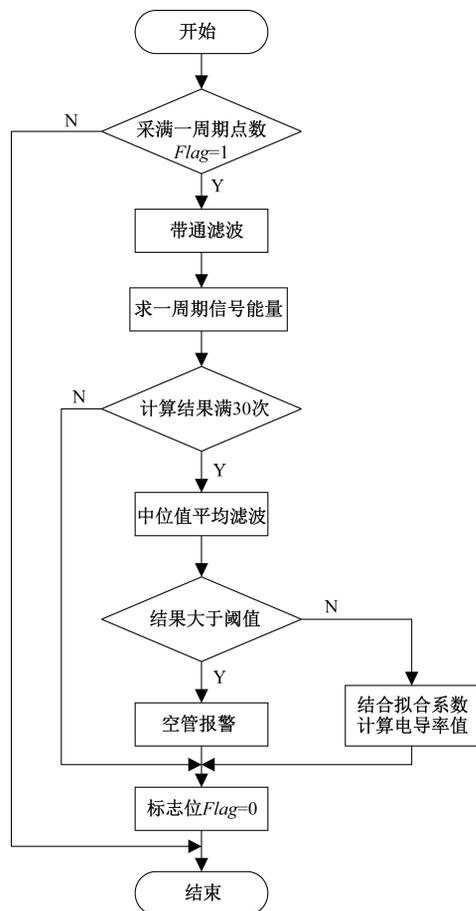


图 8 算法流程

Fig. 8 Program flow chart

以及噪声干扰,之后计算该周期信号能量大小。判断计算结果是否满足一定点数,若满足则进行中位值平均滤波,判断计算值是否大于空管阈值,若大于阈值则空管报警,若小于阈值则根据拟合系数计算电导率结果,最后结束算法流程。



4 实验测试

将本文研制的电导率测量系统与电磁流量计二次转换器系统结合,在 DSP 处理器上实时处理数据并显示电导率测量结果。首先对电导率测量系统进行标定。然后进行流速实验,实现流量与电导率的同时测量。

1) 标定实验

将一次传感器放置在静水盆中,传感器口径为 DN40,圆形电极面积为 1 cm^2 ,电极材料为不锈钢 316 L。水源取自饮用自来水,电导率范围是 $125 \mu\text{S}/\text{cm} \sim 1250 \mu\text{S}/\text{cm}$,水位至充满测量管道,通过加入一定量的 KCL 浓溶液 ($1 \text{ mol}/\text{L}$) 改变溶液电导率,室温保持在 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,实验装置如图 9 所示。



图 9 实验装置

Fig. 9 Experimental apparatus

以上海雷磁 DDB-303A 便携式电导率测量仪的测量结果作为实验标准值,仪器精度为 1%,高频方波激励

频率为 250 Hz ,系统数据处理结果通过 RS485 通信实时上传至上位机并保存,每次改变溶液电导率后均充分搅拌均匀静置,待稳定后进行数据与标准值的采集,实验测量 20 组数据,采用奇数组拟合,偶数组验证的方式,电导率用式(13)拟合。

$$\sigma = \frac{1}{a\sqrt{P} + b} \quad (13)$$

拟合得到系数 $a=0.0173$, $b=-0.002481$,将偶数 10 组数据代入式(13)计算误差,结果如表 1 所示。

表 1 标定实验误差结果

Table 1 Calibration experiment error results

序号	电导率值/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	计算结果/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	误差/%
1	182.5	184.6	1.16
2	304	302.2	-0.58
3	576	570.4	-0.97
4	834	827.0	-0.84
5	1128	1138.9	0.96
6	1424	1410.5	-0.95
7	1753	1754.7	0.10
8	2060	2060.4	0.02
9	2630	2649.5	0.74
10	3060	3031.1	-0.95

实验结果表明,研制的测量系统在生活用水 $100 \sim 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的电导率范围内达到 3% 的测量误差。

2) 流速实验

在 XBT 水流量标准装置 (DN15-50) 上进行流速实验。通过向水箱中加入 NaCl 改变流体的电导率值,实验设置 5 个电导率变化点,在每一个电导率下,改变流速,测量不同流速下的电导率值。不同流速条件下,电导率测量结果如表 2 所示;流体电导率为 $205.6 \mu\text{S}/\text{cm}$ 时,水流量标定结果如表 3 所示。由表 2,3 可知,在并行激励的前提下,实现了流量与电导率的同时测量;同一流速下的不同电导率测量值误差满足精度要求;水流量标定精度优于 0.5 级。

表 2 不同流速条件下电导率测量结果

Table 2 Conductivity measurement results with different velocity

流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	电导率标准值/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$									
	205.6		428.2		582.0		814.0		1101.0	
	测量值	误差/%	测量值	误差/%	测量值	误差/%	测量值	误差/%	测量值	误差/%
0.0	209.28	1.76	430.79	0.60	579.93	-0.36	823.96	1.21	1085.35	-1.44
0.5	210.05	2.12	430.70	0.58	581.29	-0.12	820.53	0.80	1096.94	-0.37
1.0	210.56	2.36	430.90	0.63	580.19	-0.31	812.95	-0.13	1092.82	-0.75
2.0	210.05	2.12	430.12	0.45	579.71	-0.40	813.88	-0.01	1092.74	-0.76
3.75	210.50	2.33	427.79	-0.10	578.31	-0.64	814.49	0.06	1092.28	-0.80
5.0	210.62	2.38	423.72	-1.06	579.10	-0.50	817.46	0.42	1093.73	-0.66



表 3 水流量标定结果

Table 3 Water flow calibration results

序号	标准流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	测量流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/ 差/%	重复 性/%
1	5.003	4.998	-0.096	0.091
	4.994	4.996	0.043	
	4.989	4.992	0.074	
2	3.806	3.811	0.139	0.061
	3.807	3.811	0.097	
	3.802	3.803	0.018	
3	2.111	2.111	-0.026	0.026
	2.110	2.109	-0.055	
	2.110	2.110	-0.002	
4	0.996	0.997	0.084	0.086
	0.997	0.998	0.081	
	0.996	0.998	0.232	
5	0.500	0.500	0.018	0.059
	0.500	0.499	-0.092	
	0.500	0.499	-0.076	

5 结 论

本文提出单路高频方波的激励方式测量电导率,设计了激励电路与信号调理电路,以数字信号处理器为核心,研制电磁流量计电导率测量系统,实现了磁场与附加激励并行激励,提高了电导率测量的精度,保证了实时性。采用带通滤波和基于能量衰减的数字信号处理方法,有效滤除信号中的直流干扰和工频干扰,实现电导率准确测量。流速实验结果表明,电导率测量结果不受流速大小的影响,可实现流量和电导率的同时测量,且研制的电导率测量系统在电导率为 $100 \text{ mS/cm} \sim 3 \text{ mS/cm}$ 范围内满足 3% 的测量精度要求,水流量标定精度优于 0.5 级。

参考文献

- [1] 赵保生,吴蓉,刘志森,等. 电磁流量计发展及趋势[J]. 自动化仪表,2017,38(5):67-71.
ZHAO B SH, WU R, LIU ZH S, et al. Development and trend of electromagnetic flowmeter[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38 (5): 67-71.
- [2] 吴建平,徐科军,许伟,等. 基于微分干扰补偿的新型电磁流量测量方法[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(9):117-123.
WU J P, XU K J, XU W, et al. New electromagnetic flow measurement method based on differential interference compensation[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(9):117-123.
- [3] 余翔,张冰,林桢,等. 基于 Van Der Pauw 原理的溶

液电导率计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2):371-375.

YU X, ZHANG B, LIN ZH, et al. Solution conductivity meter based on Van Der Pauw principle[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering), 2015, 49 (2): 371-375.

- [4] 苏瑞东. 一种基于电涡流的电解质溶液电导率测量方法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(3):678-681.
SU R D. A method for measuring the conductivity of electrolyte solution based on eddy current is presented[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(3):678-681.
- [5] SCHRAG D, HENCKEN K, ANDENNA A. A3.1 - from flowmeter to advanced process analyser [C]. Proceedings Sensor, 2011:67-72.
- [6] SCHRAG D, GROTHEY H, HENCKEN K, et al. Method and device for operating a flow meter[P]. US 7546212, 2009-06-09.
- [7] RUFER H, DRAHM W, SCHMALZRIED F. Method for predictive maintenance and/or method for determining electrical conductivity in a magneto-inductive flow-measuring device[P]. US8046194 B2, 2011-09-25.
- [8] HENCKEN K, SCHRAG D, GROTHEY H. Impedance Spectroscopy for diagnostics of magnetic flowmeter[C]. Proceedings of the IEEE Sensors, 2008:1112-1115.
- [9] CUI W H, LI B, CHEN J, et al. A novel method of multi-information acquisition for electromagnetic flow meters[J]. Sensors, 2015, 16(1):25.
- [10] 李斌,陈洁,崔文华,等. 带有流体阻抗测量的电磁流量计[P]. CN103591991A, 2014-02-19.
LI B, CHEN J, CUI W H, et al. Electromagnetic flowmeter with fluid impedance measurement [P]. CN103591991A, 2014-02-19.
- [11] 王高扬,李斌,胡金根. 基于 EIS 的电磁流量计流体电导率检测方法研究[J]. 中国科技论文,2016,11(20):2312-2315,2341.
WANG G Y, LIN B, HU J G. Study on the method of detecting the fluid conductivity of electromagnetic flowmeter based on EIS [J]. China science paper, 2016, 11(20):2312-2315, 2341.
- [12] 杨双龙,徐科军,梁利平,等. 基于 DSP 的浆液型电磁流量计的研制[J]. 仪器仪表学报,2011,32(9):2101-2107.
YANG SH L, XU K J, LIANG L P, et al. Development of slurry electromagnetic flowmeter based on DSP [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(9):



2101-2107.

- [13] 张然,徐科军,杨双龙,等. 采用梳状带通滤波的电磁流量计信号处理系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(2): 177-183.
ZHANG R, XU K J, YANG SH L, et al. Digital signal processing system for electromagnetic flowmeter with comb-shaped band-pass filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(2): 177-183.
- [14] 杜清府,任文建,张超. 低功耗电磁流量计的设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2015(3): 25-27.
DU Q F, REN W J, ZHANG CH. Design and realization of electromagnetic flowmeter with low power consumption[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015(3): 25-27.
- [15] 卢书杰. pH/电导率在线检测仪的研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
LU SH J. Research on online pH/conductivity detector [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.

作者简介



周念, 2017 年于山东交通学院获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 DSP 应用技术。

E-mail: cfx_zhou@163.com

Zhou Nian received his B. Sc. degree from Shandong Jiaotong University in 2017.

Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research direction is DSP application technology.



黄云志 (通信作者), 2005 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为信号处理、机器感知、智能仪表等。

E-mail: hqyz@hfut.edu.cn

Huang yunzhi (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2005. Now she is a professor and M. Sc. supervisor at Hefei University of Technology. Her main research interests are signal processing, machine perception and intelligent instrument.