

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407903

宽量程高精度电磁式电导率检测方法研究*

孙斌 叶双莉 吕喜瑞

(南京邮电大学自动化学院 南京 210046)

摘要:针对传统水质检测过程中测量范围受限且测量系统不稳定等问题,设计了一种宽量程高精度电磁式电导率测量装置,并优化量程切换控制方法,完成对溶液浓度的宽量程、高精度、高稳定性检测。大量程电导率测量系统在量程切换时对阈值设定较为敏感,首先,通过实验优化选择溶液电导率的最佳阈值拐点,并对阈值附近频繁切档的信号采用逐点比较锁定量程法锁定在某一量程区间,提高系统稳定性和可靠性。其次,考虑到锁定区域信号准确度低,使用模糊隶属度函数数据融合算法,在对十种电导率溶液进行最小均方根误差实验后选定最佳模糊区间,完成锁定信号的融合处理。最后,代入多组实测数据对所提方法进行了有效性验证。实验结果表明,经过参数优化后的融合算法可实现阈值边缘电导率的准确测量,测量误差最高为0.85%,明显优于最高相对误差为2.86%的传统单一档位测量法。此外,设计的电导率传感器检测范围在0.1~2 000 mS/cm,全量程测试的相对误差均小于1%,表明本研究方法可实现溶液电导率的高精度、宽量程检测。

关键词: 电磁式电导率;最佳阈值拐点;逐点比较锁定量程法;数据融合

中图分类号: TN98;TP216+.1

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.40

Research on electromagnetic conductivity detection method with wide range and high precision

Sun Bin Ye Shuangju Lyu Xirui

(School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

Abstract: Aiming at solving the problems existing in the traditional water quality detection process with the limited measurement range and the instability of the measurement system, a wide-range and high-precision electromagnetic conductivity measuring device was designed, and the range switching control method was optimized to achieve wide-range, high-precision and high-stability detection of solution concentration. The large-range conductivity measurement system is rather sensitive to the threshold setting during range switching. Firstly, through experiments, the optimal threshold inflection point of the solution conductivity is optimized and selected. For the signals that frequently switch ranges near the threshold, the method of locking the range by comparing point by point is adopted to lock them in a certain range interval, so as to improve the stability and reliability of the system. Secondly, considering the low accuracy of signals in the locked area, the data fusion algorithm based on the fuzzy membership function is used. After conducting the least root mean square error experiments on ten kinds of conductive solutions, the optimal fuzzy interval is selected to complete the fusion processing of the locked signals. Finally, multiple sets of measured data were substituted into the proposed method to verify its effectiveness. The experimental results show that the fusion algorithm after parameter optimization can achieve accurate measurement of the conductivity at the threshold edge, with the maximum measurement error being 0.85%, which is significantly better than the traditional single-range measurement method with a maximum relative error of 2.86%. In addition, the detection range of the designed conductivity sensor is from 0.1 to 2 000 mS/cm, and the relative errors in the full-range tests are all less than 1%. It indicates that the method proposed in this paper can achieve high-precision and wide-range detection of solution conductivity.

Keywords: electromagnetic conductivity; optimal threshold inflection point; point-by-point comparison of locked-range methods; data fusion

收稿日期: 2024-10-19 Received Date: 2024-10-19

* 基金项目: 装备预研重点实验室基金(6142207210202)项目资助

0 引言

电导率传感器广泛应用于工业水处理、环保检测和医疗卫生等领域^[1-2]。为其更好地推动各行业发展、提高生产效率、保证产品质量以及加强科学研究,这就要求电导率测量系统必须具备多个特性。从测量需求来看,不同的应用场景对溶液电导率测量的要求较高,例如,国家规定的饮用纯水电导率范围一般在 $0 \sim 10 \mu\text{S}/\text{cm}$,而工业废水因含有大量无机盐和金属离子等杂质,其电导率可达 $30\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以上,这就要求电导率测量系统具备宽量程的特性^[3]。同时,在水质监测中,微小的水质变化都可能导致电导率改变,这对测量精度提出了严格要求^[4]。从测量成本来看,在很多长期监测的应用场景中,稳定性差的传感器容易出现性能下降或故障,需要频繁地进行维护、校准和更换,检测成本显著提升。因此,研究一种宽量程、高精度、高稳定性的电导率传感器具有重要意义。

目前,为解决电导率传感器检测中存在的诸多问题,学者们做了大量的尝试。李登^[5]设计了一种高电导电极传感器和一种低电导电极传感器,实现了高低电导率同时测量,但高电导电极传感器相对复杂,且耐压性较差,在适应范围上有一定的限制。陈海琪等^[6]改变传统定量程测量策略,设计了一种自适应量程切换电路,根据输出信号强弱选择不同测量档位,测量范围显著提高。但在低浓度时,由于外界电磁及电路本身噪声,虽采用滤波电路初步降噪,仍存在较大误差,无法保证全量程的测量精度^[6-9]。张炳玮等^[10]改进电路设计、优化参数与算法,有效抑制了电路及测量环境中无关噪声对电路的干扰,提高测量精度,但未对电路抖动所导致的频繁切档问题深入研究,稳定性不高^[11-14]。苏淑靖等^[15]和吴梦香^[16]在研制了量程自适应切换系统时,采用互相关算法降低系统噪声并引入缓冲区改善频繁切档问题,实现检测电导率时量程的动态控制与消抖。然而不同档位的测量精度存在差异,缓冲区测量误差波动较大。殷建军等^[17]设计的冷却循环水系统电导率检测仪,通过比较测量法来提高系统稳定性,复合滤波算法来减少测量误差,得到了一个高精度的电导率检测系统。但这种方法对输出信号有相应要求,一阶滤波算法在提高稳定性的同时也延长了系统响应时间。刘云龙等^[18]在传感器研究中引入了融合算法,不仅提高了整体测量精度,还改善量程阈值区域连续性^[19-20]。以上多数研究均为针对电导率溶液宽量程、高精度检测,量程切换拐点以 AD 最佳辨别范围作为选择依据,并未考虑实际测量情况下切换点设置的准确度;通过设置缓冲区降低电路抖动导致频繁切档现象,但却忽略了该部分区域的测量误差。

本研究设计的传感器充分利用传统测量系统优势,并结合实际测量数据,提出了一种多量程高精度电导率检测方法。通过实验对相邻档位电导率测量,选择最佳阈值拐点,完成微处理器各量程阈值设定。为避免信号抖动而导致量程交界处出现量程反复抉择与频繁切档问题,引入了逐点比较锁定量程法,当探头完全被浸没在溶液,如果出现多次切档现象,则将量程锁定在刚切档的量程范围内,直到输出 1 000 个采样点后解除锁定,按该方法循环。而对锁定区域的信号由于量程的测量精度不同,可能会出现较大误差,采用模糊 S 隶属度函数,再进行最小均方根误差 (root mean square error, RMSE) 实验后,依据全局最优原则选定最佳模糊区间作为隶属度函数的上下限,实现对锁定信号的融合处理,完成稳定、可靠的电导率检测系统设计。

1 电导率传感器的测量原理

1.1 整体结构

设计了一种电磁式电导率传感器测量电路,以验证大量程电导率测量与自适应量程控制方法的实现。电磁式电导率传感器的系统整体结构如图 1 所示,主要包括测量探头、电源模块、激励信号发生模块、量程控制模块、温度补偿模块、数据采集与处理、通信模块以及上位机。

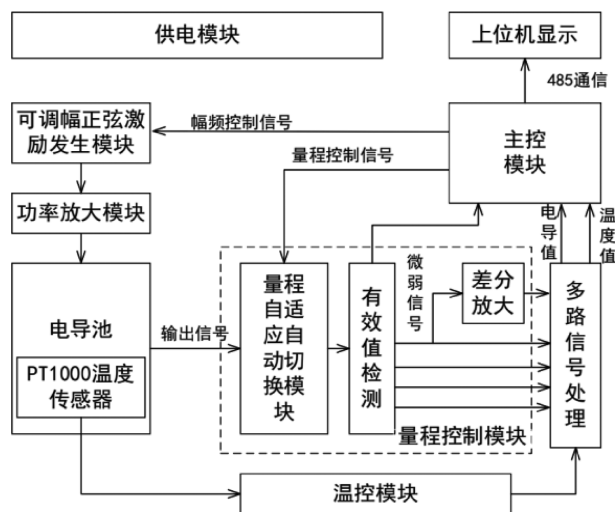


图 1 系统结构

Fig. 1 System structure diagram

其中,激励信号发生模块主要是产生一定幅值与频率的交流激励源,作用于激励线圈上。考虑到产生的激励源较弱,难以驱动激励线圈正常运行,加入了功率放大模块来增加电路带负载能力。量程切换模块采用了两级放大电路,初级放大电路采用可编程运算放大器对探头输出信号的强弱进行 4 种增益的放大,为方便后续单片

机信号处理,放大后的信号将经过有效值检测模块转换为直流量。其中小量程中低电导率信号变化率太低,鉴于此,对该部分区域采用二次放大以提高测量分辨率和准确性。温度变化通过改变离子运动,进而对电导率测量产生干扰,采用了更为精确和高效的三线制电桥法测量温度,实现温度补偿。单片机工作系统接收到输出电压信号,通过分段数据拟合将电压转化为电导率,同时控制 RS485 通信模块将数据发送到上位机实时显示。电导率传感器电路实物如图 2 所示。

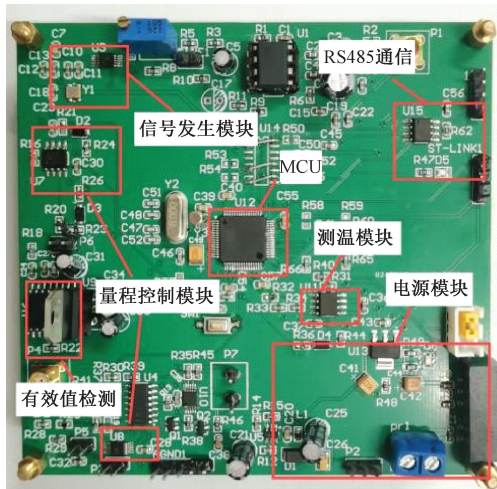


图2 电路实物

Fig. 2 Physical diagram of the circuit

1.2 工作原理

电磁式电导率测量系统的实现是基于电磁感应原理,核心部分是两个绕有不同匝数的输入输出磁环。当液体流过通有交流激励信号的输入磁环时,将会引起输入线圈交变磁场磁通量变化,产生感应电流。电流流过输出磁环,输出线圈又因磁场变化产生感应电压,其传感器探头内部结构如图 3 所示。

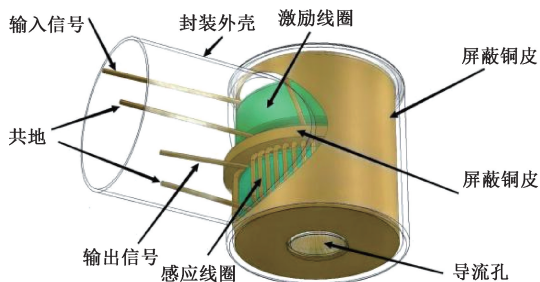


图3 探头结构

Fig. 3 Probe structure diagram

电导池的等效电路如图 4 所示。定义磁环的内径 r 、外径 R 、高度 h , ρ 为介于磁环内径与外径之间的任意半径。

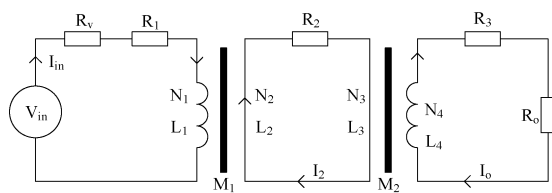


图4 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit diagram

其中, V_1 为激励源电压, R_i 、 R_1 分别为激励源内阻和激励线圈等效电阻, N_1 、 N_4 为激励线圈和感应线圈匝数, N_2 、 N_3 为等效液体回路匝数, R_2 为液体回路等效电阻, I_2 为液体回路电流。

由安培环路定律得:

$$H \times 2\pi\rho = N_1 I_1 \quad (1)$$

H 为磁场强度,由此可计算出激励线圈绕组的磁感应强度 B_1 ,如式(2)所示, μ_1 为激励磁芯磁导率。

$$B_1 = \mu_1 H = \frac{\mu_1 N_1 I_1}{2\pi\rho} \quad (2)$$

磁通量 φ_1 是磁感应强度在一定面积上的积累效果,再由法拉第磁感应定律可得出液体回路电压 V_2 :

$$V_2 = -j\omega N_2 \varphi_1 = -j\omega N_2 \int_{s_1} B_1 ds \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),并进行简化:

$$V_2 = -\frac{j\omega\mu_1 N_1 I_1 h}{2\pi} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (4)$$

通过液体回路等效电阻 R_2 、液体等效电阻长度 l ,液体等效电阻横截面积 S :可得出液体电导率 σ ,如式(5)所示。

$$R_2 = \frac{l}{\sigma S} \quad (5)$$

其中, $l = 2h + d$ (d 为两线圈的间距), $S = \pi r^2$,根据欧姆定律计算液体回路电流 I_2 :

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} = -\frac{j\omega\mu_1 N_1 I_1 h S}{2\pi l} \ln\left(\frac{R}{r}\right) \cdot \sigma \quad (6)$$

同理,可计算出输出电压 V_3 如式(7)所示。

$$V_3 = -\frac{\omega^2 \mu_1 \mu_2 N_1 N_4 I_1 h^2 S}{4\pi^2 l} \ln^2\left(\frac{R}{r}\right) \cdot \sigma \quad (7)$$

其中, ω 为角频率,且 $\omega = 2\pi f$,将其与 l 、 S 代入式(7)可得出完整的 V_3 :

$$V_3 = -\frac{f^2 \mu_1 \mu_2 N_1 N_4 I_1 h^2 \pi r^2}{2h + d} \ln^2\left(\frac{R}{r}\right) \cdot \sigma \quad (8)$$

由式(8)可知,输出电压与电导率呈线性关系,在实际测量时,只需获取探头输出电压信号即可得到待测溶液的电导率。

2 系统的硬件设计

2.1 量程控制电路

量程切换电路的原理如图 5 所示,量程控制开关作为量程切换的关键器件,目前大部分采用数字控制模拟开关,但是需要外连增益调节电路才能使用,电路相对复

杂。因此,本研究选用了一款具有数字式可编程增益的仪表放大器 AD8250 作为量程切换模块的核心芯片,其低失真、低失调增益和出色的交流性能使输入信号稳定放大的同时,能够保持良好的信号质量和精度。该芯片灵活性高且电路简单,通过引脚可编程方式实现增益选择,方便用户根据输入信号强弱和后续处理需求调整放大器的倍数。

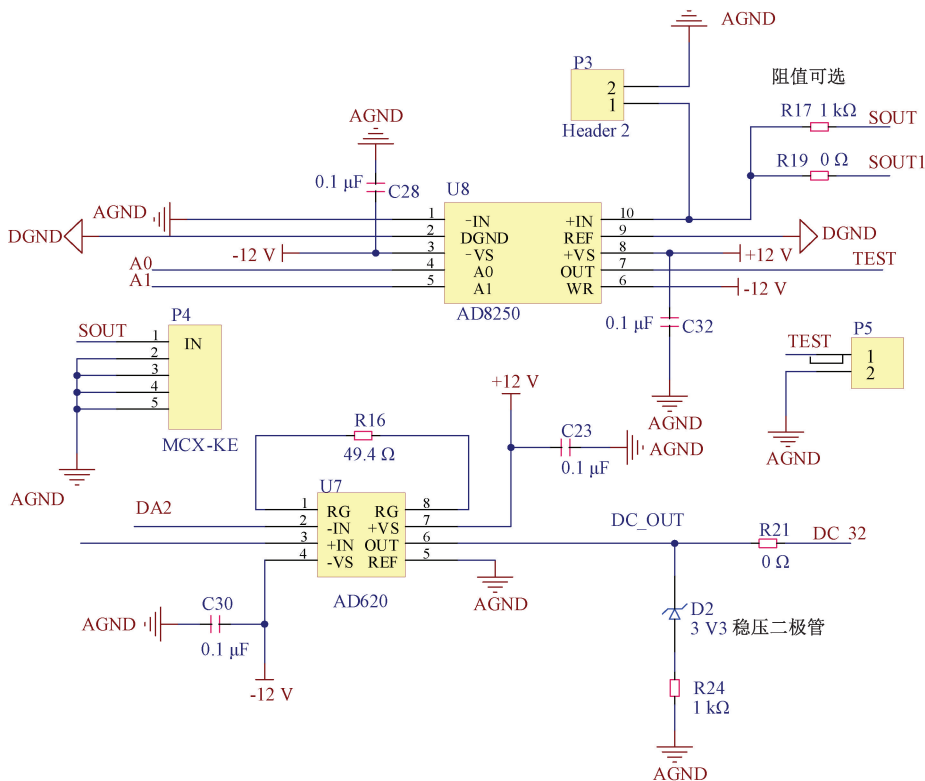


图 5 量程控制电路

Fig. 5 Range control circuitry

对于小量程档位中输出电压放大后仍低于 200 mV 的信号会经过高精度 AD620 仪表放大器再次放大,保证低电导率的输出信号能达到清晰识别的范围。

激励信号经过不同电导率溶液后,由于电导率与输出电压的线性相关性,会产生不同的输出电压。如果使用同一放大调理电路进行放大,可能导致小信号失真,大信号超限,因此,需根据输出信号强弱选择合适的放大增益。在本系统中,将输出信号初步划分为 4 个量程的测量区域,对应倍数分别为 1 倍、2 倍、5 倍和 10 倍的放大,单片机工作系统通过控制 AD8250 的 A0、A1 引脚的电平状态自动导通与关闭各量程,从而实现不同范围内电导率的量程快速切换。其中,对于低电导率测量区间,由于信号过于微弱仅在几毫伏内变化,经最大倍数(10 倍)处理后依旧无法清晰检测,因此在初步放大的基础上对其部分区域进行二次放大提高分辨率。位于两量程交界

处的电导率,会因频繁的档位切换产生错误,采用逐点比较锁定量程法锁定信号,并对产生量程频繁切换的区域采用模糊控制融合算法提高测量精度。

2.2 有效值转换电路

考虑到输入交流正弦波作为激励信号,量程切换后输出电压为交流量。为方便后续信号处理,需经过有效值转换电路将交流信号转化为直流信号。根据系统高精度和宽范围的测量需求,选用了 AD637 作为有效值转换电路的核心器件,其对应电路如图 6 所示。

AD637 作为高精度真有效值转换器,其输入范围受供电电压影响。在 ± 15 V 电源下可连续输入 RMS 0~7 V 电压,本系统采用 ± 5 V 供电,输入电压有效值最高可达 3 V,能够满足本系统信号测量需求。在电路中,输入端串联一个 0.1 μ F 的电容来滤除输入信号中的直流分量,输出端分为两路:一路接次级放大模块,完成低电导率的

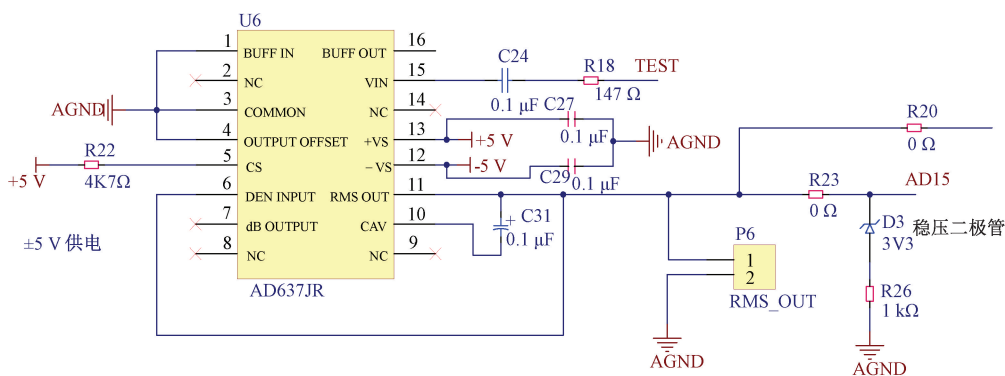


图6 有效值转换电路

Fig. 6 RMS conversion circuit

后续处理;另一路直接连单片机的AD引脚,CPU对该信号处理后将作为量程是否正确选择的判断依据。

2.3 温度检测电路

温度变化会影响溶液中离子迁移速率和电离程度,对电导率而言,当温度升高或降低时,电导率会相应地增加或减少,采用了温度保持或电导率修正的方式来降低温度对测量结果的影响。本研究选用铂热电阻PT1000来实现温度测量,PT1000的电阻值随温度变化呈线性关

系,在一定温度范围内,电阻值与温度之间的关系如式(9)。

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2) \quad (9)$$

式中: R_t 是 t 温度下的电阻值; R_0 是参考温度下(0°C)对应 $1000\ \Omega$ 的电阻值; a 和 b 为常数。通过测量电阻两端的电压,结合欧姆定律和式(1)可获得该环境下的温度 t 。其中,电阻两端的电压采用三线制接线法测量,电路如图7所示。

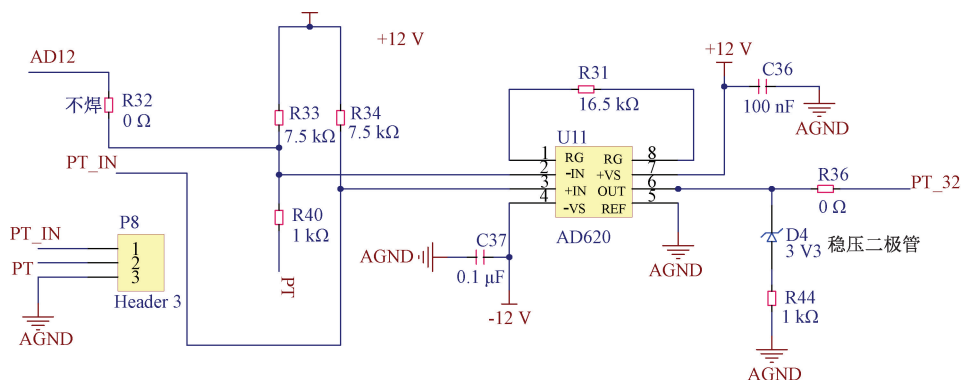


图7 温度检测电路

Fig. 7 Temperature detection circuits

热电阻PT1000作为电桥的一个桥臂电阻,将一根导线连接到电桥的电源端,另外两根分别接到铂电阻所在桥臂和其相邻桥臂上。当温度变化时,电桥的两个桥臂都引入了相同电阻值的引线电阻,可以互相抵消,提高了测量精度。单片机的AD口实时采集电阻两端电压值并转换成温度,经过式(10)统一补偿到 25°C 的电导率。

$$k_s =$$

$$\begin{cases} k_t/(0.0169t + 0.5583), & 1^\circ\text{C} \leq t \leq 10^\circ\text{C} \\ k_t/(0.018t + 0.5473), & 10^\circ\text{C} \leq t \leq 20^\circ\text{C} \\ k_t/(0.0189t + 0.5281), & 20^\circ\text{C} \leq t \leq 30^\circ\text{C} \\ k_t/(0.022t + 0.45), & t \text{ 为其他温度} \end{cases} \quad (10)$$

3 系统的软件设计

3.1 自适应量程切换

本系统采用了自适应量程控制方法实现量程切换,该方法通过不断地根据实际测量结果反馈调整档位,以适应不同的测量对象和测量环境,实现更加精准的测量,自适应量程切换流程如图8所示。

首先,根据选定的最佳阈值拐点以及可编程放大器不同增益模式,设定各量程阈值区间(R_L, R_H)。随后,在初始化最大档位下(1倍放大)测得输出电压真有效值

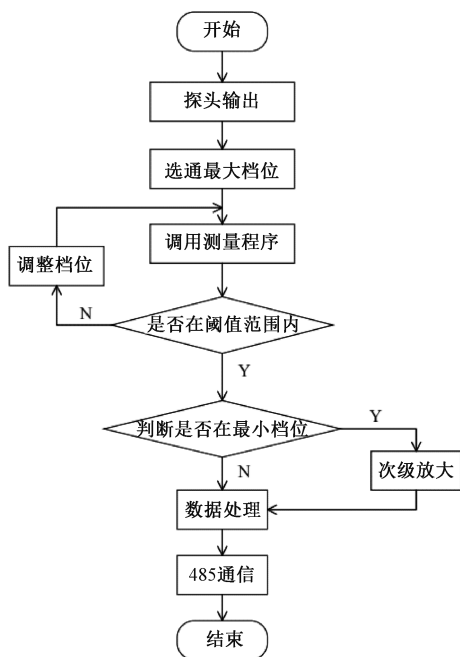


图 8 量程切换流程

Fig. 8 Flowchart of the range switching

R_x , 利用该档位下首次测量结果与设定的量程阈值对比, 反馈调整合适档位, 确保后续的测量能够在最优化的条件下进行, 从而提高可靠性和准确性。该方法通过微处理器预设各量程区间, 并基于阈值比较法反馈调整量程, 故测量过程中最多只需一次换挡, 降低了传统量程切换系统中逐步切档带来的资源消耗。

3.2 逐点比较锁定量程

利用 STM32 实时处理能力, 可以对每个采样点进行阈值比较, 判断完成后根据比较结果进行换挡处理, 实现自适应量程自动切换功能。考虑到因电路信号波动以及外部电磁干扰导致输入信号在两个量程间反复抉择, 造成输出信号不稳定现象, 信号失真度较高。如图 9 所示, 绘制了 153.18 mS/cm 的电导率溶液在 2 min 时间内连续测量的 150 组输出信号分布图(每组数据取 50 个采样点的平均值)。由图 9 可看出, 信号在 194~207 mV 电压范围内来回波动, 波动区间最大可达 13 mV。

为降低信号波动可能出现的反复切档问题, 采用了逐点比较锁定量程法提高系统稳定性。当探头放入电导池稳定后, 若出现 3 次以上的反复切档现象, 则在下次切档时, 发出量程锁定信号, 将信号锁定在该量程测量范围内, 直到输出 1 000 个采样点时, 解除量程锁定, 重复该步骤, 实现传感器稳定性测量。

3.3 基于隶属度函数数据融合

逐点比较锁定量程法在测量阈值边缘电导率溶液时, 可以很好的将信号锁定在某一量程区间, 改善频繁切

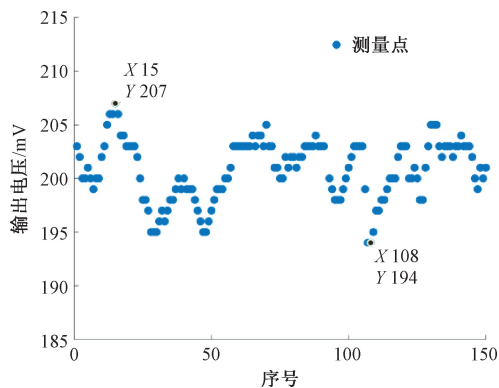


图 9 信号波动

Fig. 9 Signal fluctuation chart

档问题。但由于不同量程的测量精度存在差异, 拟合公式对不同采样点契合度不同, 导致锁定信号的测量误差偏大。因此, 本系统在逐点比较锁定量程的基础上, 引入了一种基于隶属度函数的融合算法, 保留频繁切档过程中两量程测量结果, 结合模糊隶属度函数计算 RMSE 最小值, 优化隶属度函数的模糊区间, 对锁定区域的信号加权融合, 在提高系统稳定性的同时提高测量精度。

电导率传感器的测量结果具有渐变特性, 本研究选用了 S 型隶属度函数进行数据融合, 该

S 型隶属度函数如式(11)所示。

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq c \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & c \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (11)$$

式中: a 为模糊下限; b 为模糊上限; $c = (a+b)/2$, x 为函数自变量; $f(x)$ 表示隶属度, 取值范围在 0~1 之间。利用 S 隶属度函数计算权重对锁定信号加权融合, 融合后的数据 σ 可表示为:

$$\sigma = \sigma_2 \cdot f(x) + \sigma_1 \cdot [1 - f(x)] \quad (12)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为不同量程的测量值; σ 的融合效果与隶属度函数的上下限直接相关。本研究选择 RMSE 和相关误差 R 表征数据的融合效果, 如式(13)、(14)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\text{理论值} - \text{实际值})^2}{n}} \quad (13)$$

$$R = \frac{|\text{理论值} - \text{实际值}|}{\text{理论值}} \times 100\% \quad (14)$$

RMSE 是反映了测量值整体的偏差情况, 其中 n 为样本数量, RMSE 单位与原始数据相同。相对误差 R 能更加直观的反映测量值的准确程度。

4 实验结果及分析

4.1 阈值选取

以 1、2 档位为例,在 25℃ 下,分别使用两档位对不同标准电导率溶液进行测试,每次实验待系统稳定后,取 50 个测量结果的平均,如图 10 所示。

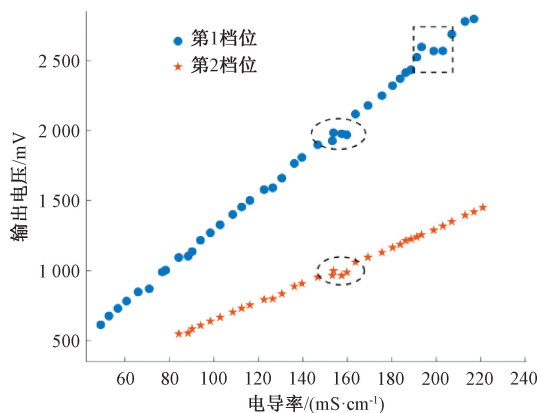


图 10 两个量程测量结果

Fig. 10 Two-range measurement results

由图 10 可看出,当标准电导率溶液在 80.2 ~ 147 mS/cm, 160 ~ 188 mS/cm 时,采用 1、2 档位测量出来的信号都具有较好的线性效果,但是在 188 mS/cm 以上时,采用 1 档测量的结果线性度明显降低,而 2 档位的测量信号仍然具有很好的线性。在对 147 ~ 160 mS/cm 电导率进行测量时,发现两个档位测量的结果都出现了较大的偏差。如果选择阈值切换点 < 147 mS/cm 或 > 160 mS/cm 时,那么总存在一个档位 147 ~ 160 mS/cm 的测量值误差较大,并且无法保证输出信号在 AD 最佳输入范围 (10 mV ~ 2 V), 因此阈值切换点的选取应在 147 ~ 160 mS/cm。1、2 档位量程分别采用电导率 147 mS/cm 以下和 160 mS/cm 以上的采样点进行数据拟合,随后,利用拟合后的系统分别对 147 ~ 160 mS/cm 电导率精细测量,测量结果如图 11 所示。

在 147 ~ 153.8 mS/cm 范围内,第 1 档位测量结果更接近实际值,准确度更高。而在 153.8 ~ 160 mS/cm 范围内,测量结果完全相反,因此通过实验分析,最佳阈值拐点选择 153.8 mS/cm 最为合适,此时对应的最大档位输出电压正好为 200 mV。

4.2 量程标定

本实验电导率标定采用最小二乘分段数据拟合法,受实验室测量环境的限制,本研究仍以 1、2 档位量程为例。在第 1 档位 18.4 ~ 147 mS/cm 范围内,25℃ 下,配置标准电导率为 116.2、108.5、98.4、84.2、76.8、65.9、56.8、49.1、37.4 和 18.4 mS/cm 10 种溶液作为标定值与

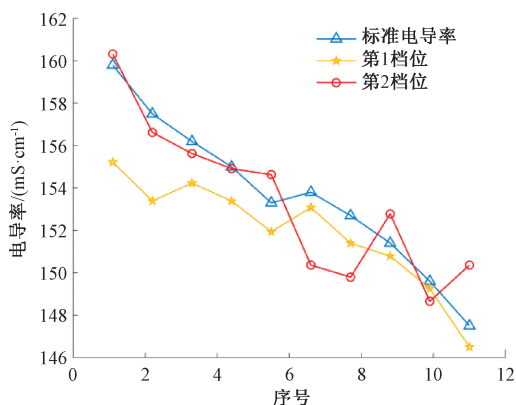


图 11 两种档位测量结果与标准电导率对比

Fig. 11 The results of the two steps are compared to the standard conductivity

输出电压进行线性拟合。如图 12 所示,拟合结果如式 (15) 所示。

$$y = 13.059x - 14.112 \quad (15)$$

$$R^2 = 0.9998$$

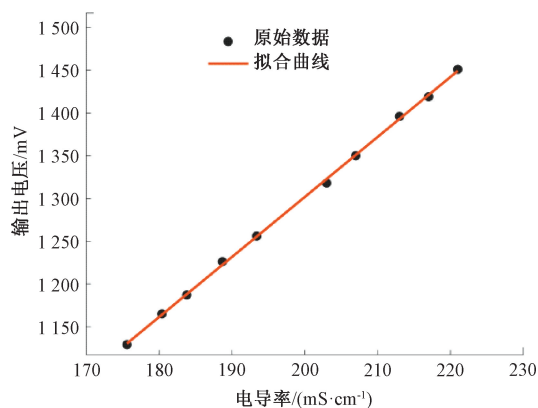


图 12 第 1 档位拟合曲线

Fig. 12 The first gear fits the curve

采用同样方法选取 221、217、213、207、203、193.4、188.7、183.8、180.4 和 175.6 mS/cm 标准电导率作为第 2 档位标定值与输出电压进行拟合。拟合结果如图 13 所示,拟合结果如式 (16) 所示。

$$y = 7.0251x - 103.3 \quad (16)$$

$$R^2 = 0.9995$$

其中, x 表示电导率, y 表示实测的输出电压,两个档位的拟合系数分别为 0.9998 和 0.9995,都接近于 1,表示具有较好的线性拟合效果。

4.3 数据融合

本研究实际测量了 147 ~ 160 mS/cm 误差较大区域内,10 种标准电导率溶液在 1、2 档位的电导率 σ_1 、 σ_2 ,如表 1 所示。

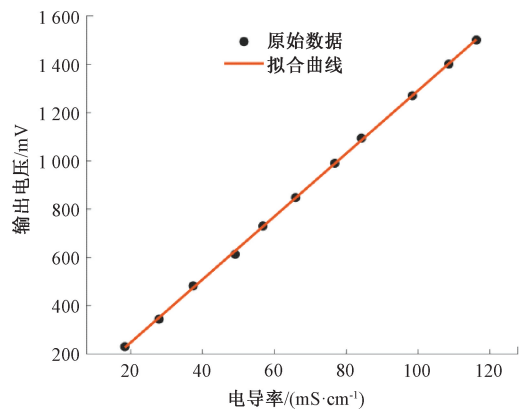


图 13 第 2 档位拟合曲线

Fig. 13 The second gear fits the curve

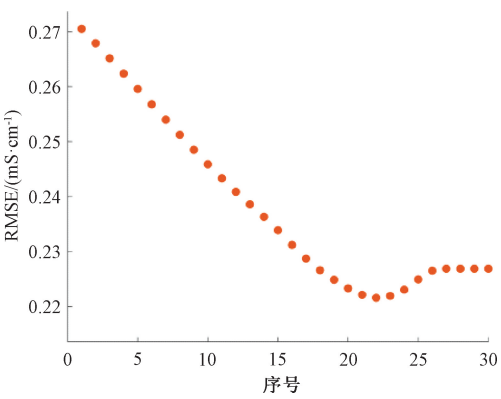


图 14 模糊上限的 RMSE 分布

Fig. 14 RMSE distribution with fuzzy upper limit

表 1 测量结果
Table 1 Measurement results

序号	标准电导率/ (mS·cm ⁻¹)	第 1 档位 σ_1 / (mS·cm ⁻¹)	误差 R / %	第 2 档位 σ_2 / (mS·cm ⁻¹)	误差 R /%
1	159.8	155.2	2.86	160.3	0.33
2	157.5	154.4	1.98	156.6	0.56
3	156.2	154.2	1.26	155.6	0.37
4	155.0	153.4	1.04	154.9	0.05
5	154.3	151.9	1.53	154.6	0.21
6	153.8	153.1	0.47	150.4	2.04
7	152.7	151.4	0.85	149.8	1.90
8	151.4	150.8	0.41	152.8	2.04
9	149.6	149.3	0.23	148.7	0.63
10	147.5	146.5	0.67	150.4	1.94

将 10 种不同标准电导率溶液的测量结果代入式 (12), 最佳阈值拐点 153.8 mS/cm 设置为隶属度函数参数 c , 变化模糊上界 a ($147 \leq a \leq 153.8$), 结合表 1 的多档位测量结果计算每个模糊区间的误差 RMSE, 得到 $D[30]$, RMSE 的分布如图 14 所示。在第 22 个采样点处, RMSE 取最小值 0.2216, 依据全局最优原则, 取该点对应的 a 值为模糊下界, b 值为模糊上界, 即可得到最佳模糊区间 151.92~155.68 mS/cm, 优化后的 S 隶属度函数如图 15 所示。

利用图 15 所示的隶属度函数作为权重, 对两量程测量结果进行加权融合, 结果如表 2 所示。在该阈值附近, 第 1 档位的测量误差最大为 2.86%, 第 2 档位的测量误差最大为 2.04%, 采用隶属度函数融合后相对误差显著降低, 最大只有 0.85%, 在保证系统稳定测量的同时测量精度明显提升。

4.4 全量程测试

本研究设计的电磁式电导率传感器采用编号为 ZCB032C 的标准电导率溶液、执行标准为 Q/

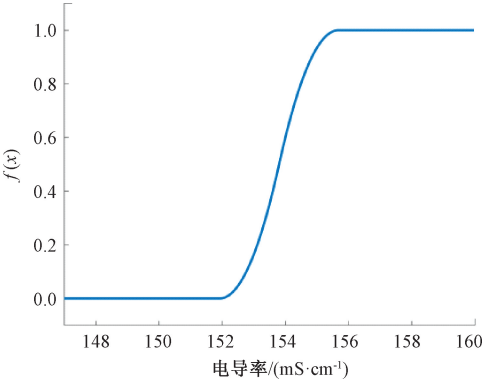


图 15 S 隶属度函数

Fig. 15 S-type membership function

表 2 融合结果
Table 2 Fusion results

序号	标准电导率/ (mS·cm ⁻¹)	融合结果/ (mS·cm ⁻¹)	相对误差/ %
1	159.8	160.3	0.31
2	157.5	156.6	0.57
3	156.2	155.6	0.38
4	155.0	154.8	0.15
5	153.3	154.2	0.09
6	153.8	153.1	0.46
7	152.7	151.4	0.85
8	151.4	151.0	0.25
9	149.6	149.3	0.20
10	147.5	146.5	0.68

321322YXJ001 的实验室超纯水以及高溶度碱性溶液对系统进行测试。用到的器材包括 FLUKE 8808A 万用表、F10 型数字合成函数信号发生器、DS 5062C 数字示波器。测量系统实物如图 16 所示。

为验证传感器标定与算法融合后全量程测量结果的精度, 每个档位随机取 2~3 种标准电导率溶液进行复测

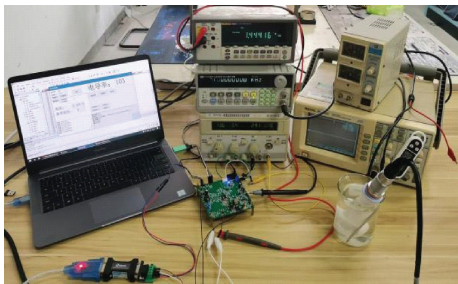


图 16 系统实物

Fig. 16 Physical diagram of the system

实验,每种浓度的测量结果为探头稳定后 50 组采样点的均值,测量结果与误差如表 3 所示。

表 3 全量程复测结果

Table 3 Full-scale retest results

序号	标准电导率/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	实际值/ ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)	相对误差/ %
1	1 789	1 802	0.73
2	1 248	1 253	0.4
3	673	678	0.74
4	426	428	0.47
5	304	303	0.33
6	276	277.8	0.65
7	221	221.2	0.11
8	198.9	198.2	0.36
9	153.3	154.2	0.59
10	78.3	77.89	0.53
11	12.88	12.79	0.70
12	1.413	1.421	0.57

从测量结果可以看出,全量程测量的相对误差均小于 1%,实现了高精度检测。

5 结 论

为了提升溶液电导率的测量范围和测量数据的准确度,提出了一种宽量程高精度的电磁式电导率检测方法。构建了非接触电磁式电导率测量模型,并通过实验分析相邻量程对同浓度溶液的检测误差与线性度,找到各量程的最佳切换拐点;引入了逐点比较锁定量程法控制信号在某一量程区间,降低信号的频繁抖动;提出了基于最小 RMSE 的模糊隶属度函数融合算法,据此确定最优函数模型,实现数据融合。

实验结果表明,本研究方法能够检测出 0.1 ~ 2 000 mS/cm 范围内的电导率。在与传统方法的对比实验中,改进算法取得了更高精度的检测效果,测量误差由 2.86%降至 0.85%,且算法稳定性高,能够实现不同环境下的实际应用,满足了水质检测需求。

参考文献

[1] 殷文志. 电场耦合型感应式电导率检测系统的研究[D]. 南京:南京林业大学,2018.
YIN W ZH. Research of electric field coupling induction type conductivity detecting system [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.

[2] 季浩宇, 谢南, 唐毅, 等. 观音岩水库建成前后下游金沙江段浊度及电导率变化分析[J]. 环境科学导刊, 2022,41(4):7-12.
JI H Y, XIE N, TANG Y, et al. Analysis on the changes of turbidity and conductivity in the lower reaches of jinsha river before and after the construction of guanyinyan reservoir[J]. Environmental Science Survey, 2022, 41(4):7-12.

[3] 郭杨盛. 离子色谱仪电导率检测电路设计与实现[D]. 太原:中北大学,2023.
GUO Y SH. Design and implementation of conductivity detection circuit for ion chromatograph [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.

[4] 王昕. 海洋盐度高精度传感器批量制备及测试[D]. 宁波:宁波大学,2021.
WANG X. Batch preparation and testing of high-precision sensors for ocean salinity[D]. Ningbo: Ningbo University, 2021.

[5] 李登. 高精度嵌入式电导率仪的研制[D]. 广州:华南理工大学,2018.
LI D. Development of high precision conductivity instrument based on embedded system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.

[6] 陈海琪. 便携式燃油电导率检测仪设计及应用[D]. 北京:北方工业大学,2022.
CHEN H Q. Design and application of portable fuel conductivity detector[D]. Beijing: North China University of Technology, 2022.

[7] 赵明忠, 陈庆荣, 陈冬峰, 等. 土壤溶液电导率测量仪设计[J]. 电子器件, 2019, 42(5):1309-1313.
ZHAO M ZH, CHEN Q R, CHEN D F, et al. Soil solution conductivity meter design[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2019, 42(5):1309-1313.

[8] 蔡声波, 任军博, 马然, 等. 基于分光光度法的多量程海水营养盐原位传感器检测系统设计[J]. 海洋科学, 2019,43(11):76-83.
QI SH B, REN J B, MA R, et al. Design of a multi-range, in-situ sensor detection system for seawater nutrient salt based on spectrophotometry [J]. Marine Sciences, 2019, 43(11):76-83.

[9] LIU N, MIAO Y, WANG T, et al. A seawater conductivity measurement method based on magnetic

- resonance coupling [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2023, 26(1): 58-65.
- [10] 张炳玮, 沈三民, 杜延墨, 等. 基于采样保持原理的高精度电导率检测电路[J]. 仪表技术与传感器, 2023(12): 37-43.
- ZHANG B W, SHEN S M, DU Y M, et al. High precision conductivity detection circuit based on sampling and holding principle [J]. Instrument Technology and Sensors, 2023(12): 37-43.
- [11] TEJASWINI K K, GEORGE B, KUMAR V J. Inductive-capacitive coupled probe for non-contact measurement of liquid conductivity [C]. IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2019, 1: 6737-6741.
- [12] 孙斌, 倪爽, 朱青, 等. 低耦合电磁式电导率测量系统的传感器优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2): 131-138.
- SUN B, NI SH, ZHU Q, et al. Sensor optimization design of low coupling electromagnetic conductivity measurement system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2): 131-138.
- [13] CHUNG W Y, RAMEZANI R F, LI C H, et al. Development of low-voltage urine sample conductivity measurement system for kidney stone risk assessment [C]. 2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on Biomedical Engineering, Healthcare and Sustainability (ECBIOS), 2021: 13-15.
- [14] KANTAMANI T, GEORGE B. Measurement of conductivity and liquid fill in partially filled pipe using capacitive-coupled noncontact probe [J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(9): 1-4.
- [15] 苏淑靖, 郭杨盛, 吴梦香, 等. 一种高精度量程自适应电导率检测电路[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(3): 137-144.
- SU SH J, GUO Y SH, WU M X, et al. A high-precision range adaptive conductivity detection circuit [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(3): 137-144.
- [16] 吴梦香. 电导率检测仪测控软件设计[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- WU M X. Design of measuring and controlling software for electricity detector [D]. Taiyuan: North University of China, 2023.
- [17] 殷建军, 傅常泰, 倪晓波, 等. 基于比较测量法的冷却循环水系统电导率检测仪研究[J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45(5): 516-519, 534.
- YIN J J, FU CH T, NI X B, et al. Based on the study of water conductivity detecting instrument applied to cooling circulating water system [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2017, 45(5): 516-519, 534.
- [18] 刘云龙, 殷松峰, 程跃, 等. 基于算法融合的全量程高精度激光甲烷传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(19), DOI:10.3788/LOP232594.
- LIU Y L, YIN S F, CHENG Y, et al. Full range and high precision laser methane sensor based on algorithm fusion [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(19), DOI:10.3788/LOP232594.
- [19] 何资星, 徐丽赞, 韩留军, 等. 一种用于双GM计数管的量程控制测量方法[J]. 核技术, 2024, 47(2): 80-87.
- HE Z X, XU L Y, HAN L J, et al. Control measurement method of range switch for dual GM counter tubes [J]. Nuclear Techniques, 2024, 47(2): 80-87.
- [20] 梅武军, 郑军, 金杰, 等. 基于滑动聚类的多传感器异步信息融合方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 109-117.
- MEI W J, ZHENG J, JIN J, et al. A sliding-clustering-based method for multi-sensor asynchronous information fusion [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 109-117.

作者简介



孙斌 (通信作者), 2008 年于江苏科技大学获得学士学位, 2015 年于南京理工大学获得博士学位, 现为南京邮电大学副教授, 主要研究方向为光电探测与信号处理。

E-mail: ffgz366@qq.com

Sun Bin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Science and Technology in 2008, and Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2015, respectively. Now he is an associate professor in Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include optoelectronic detection and signal processing.



叶双菊, 南京邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为传感器设计及信号处理。

E-mail: 2936678936@qq.com

Ye Shuangju is a M. Sc. candidate at Nanjing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests include sensor design and signal processing