

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412577

浮选液位测量用高精度差分恒流源设计与优化*

陈启标, 高云鹏, 杨唐胜, 李曦婷, 王新宇
(湖南大学电气与信息工程学院 长沙 410082)

摘要: 矿浆浮选液位测量作为选冶生产的关键环节,其测量系统中恒流源的准确性和稳定性直接影响最终产品质量。针对现有恒流源电路输出精度低、高频特性及带负载能力差等缺点,设计了一种新型高精度差分恒流源电路,通过在反馈回路和负载两端引入补偿电容,优化电路的高频特性,减小输出信号相移,并采用浮地接入负载,优化电路的负载特性,据此提高电路输出阻抗和带负载能力,最后完成对电路的仿真和实际测试。实际测量结果表明,所设计的新型恒流源在0~4 k Ω 范围内实现100 Hz~50 kHz可调、0~20 mA恒流的效果更好,电路频率特性和负载特性显著提高,最大相对误差分别为0.513%和0.378%,满足矿浆浮选工业现场液位高准确测量的实际需求。

关键词: 矿浆浮选;恒流源;高精度;补偿电容;输出阻抗

中图分类号: TD923 TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.10

Design and optimization of high precision differential constant current source for flotation level measurement

Chen Qibiao, Gao Yunpeng, Yang Tangsheng, Li Xiting, Wang Xinyu

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Slurry flotation level measurement is a key link in the production of beneficiation, the accuracy and stability of the constant current source in the measurement system directly affect the quality of the final product. Aiming at the shortcomings of the existing constant current source circuit, such as low output accuracy, high frequency characteristics and poor load capacity, a new type of high-precision differential constant current source circuit is designed in this paper. By incorporating compensation capacitors at both ends of the feedback loop and load, the circuit's high-frequency characteristics are optimized, reducing the phase shift of the output signal. Additionally, the load characteristics are enhanced using a floating access load. As a result, the circuit's output impedance and load capacity are improved. The simulation and practical testing of the circuit demonstrate its effectiveness. Measurement results indicate that the newly designed constant current source achieves an adjustable range of 100 Hz to 50 kHz and a constant current of 0 to 20 mA within a 0 to 4 k Ω range. The circuit's frequency and load characteristics show significant improvement, with maximum relative errors of 0.513% and 0.378%, respectively, meeting the high accuracy requirements for liquid level measurement in the pulp flotation industry.

Keywords: pulp flotation; constant current source; high precision; compensating capacitance; output impedance

0 引言

浮选是当前细粒和极细粒物料分选中应用最广、效果最佳的选矿方法,为原矿洗选加工提高精矿产率的重要手段^[1]。而矿浆液位的准确测量作为浮选的关键环节,直接决定着浮选效率和产品的最终质量^[2],在矿浆浮

选过程中,液位测量系统通过电极向矿浆施加正弦激励电流,测量随深度变化的电压以获取矿浆液位,其中恒流源提供直接作用于矿浆的电流激励信号,其精度和稳定性对整个测量系统的性能起决定性作用。

恒流源主要由信号发生器和电压电流转换电路组成,电压电流转换电路是实现恒流的核心。目前广泛应用的设计主要有电流镜电路^[3-4]、Howland 电流泵电路^[5-6]及

Tietze 电流泵电路^[7]。文献[8]设计用于低压和混合模式电路的自共源共栅电流镜,仅适用于 μA 级的微小恒流源。文献[9-10]采用 AD844 电流反馈型运放的一级电流镜实现恒定电流输出,并在输出端引入反馈电路,实现负载的浮地连接,提高输出阻抗的同时减小地的共模干扰,但受到 AD844 自身限制,电流输入输出范围有限,且电流镜电路对于环境温度的依赖性高,不适用于工业现场复杂的环境变化。为此,文献[11]设计增强型 Howland 电路,在正反馈回路中引入电压跟随器减小反馈分流,使电路输出电流都流经负载,从而实现恒流,采用运放设计电路降低了环境依赖性,但电路本身对电阻匹配精度要求高且高频特性不好,输出电流并不稳定,且 Howland 电路引入了正反馈,在大负载、高频时容易发生自激震荡,电路稳定性不高。文献[12]采用负载接地的 Tietze 电路,利用运算放大器的多级负反馈实现电流的恒定,避免了 Howland 电路中正反馈的引入,提高了电路稳定性。文献[13]对 Tietze 电路进行了初步设计实验验证,实现程控宽频恒流,但两者均为原始 Tietze 电路,最外一级反馈回路中的反馈电阻增加了电路的无功功耗和阻抗匹配难度,电路采用接地负载^[14],电压输出柔量和电路带负载能力低,且电路未考虑杂散电容和寄生电容^[15-16]的影响,输出电流精度^[17-19]不高,并不适用于实际浮选工业现场。

为此,本文设计了一种新型高精度差分恒流源电路,在反馈回路和负载两端引入补偿电容对电路杂散电容与寄生电容进行补偿,优化电路高频特性,采用浮地接入负载,提高电路输出阻抗、带负载能力以及电压输出柔量,优化电路稳定性,最后通过仿真和实际电路测试验证本文设计电路的输出精度和稳定性。

1 矿浆液位测量原理与负载等效阻抗模型

1.1 矿浆液位测量原理

矿浆浮选液位测量原理如图1所示,通过电极传感器向矿浆施加激励信号,根据矿浆不同高度电导率采集不同电压值以反应浮选池内部的液位高度变化。

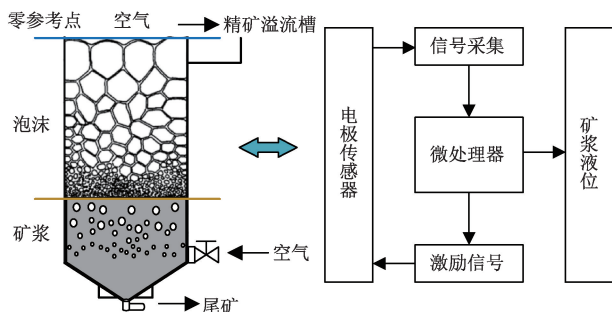


图1 矿浆浮选液位测量原理

Fig. 1 Principle of pulp flotation level measurement

在实际浮选测量过程中,受到工况现场浮选池中矿浆浓细度、温度、酸碱度以及气含率等因素的影响,矿浆电导率呈现出非线性的特征,其中气含率对电流的阻碍作用最大,导致矿浆在不同高度的电导率变化显著。因此,可通过对电极传感器施加恒定电流测电压计算矿浆负载的相对电导率,以相对电导率首次跳变最大点来表征矿浆-泡沫分界面,有:

$$\begin{cases} Z_x = \rho \frac{L}{S} = \frac{L}{\delta S} = \frac{U_x}{I_{out}} \\ \sigma_x = \frac{I_{out}}{U_x} = \frac{1}{Z_x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为电阻率; δ 为电导率; L 为矿浆导体长度; S 为矿浆导体横截面积; Z_x 为矿浆负载阻抗; U_x 为矿浆负载电压; I_{out} 为激励电流; σ_x 为相对电导率。

以电极传感器最上端为零参考点,与精矿溢流槽对齐,测试得到矿浆相对电导率 σ_x 分布曲线如图2所示。

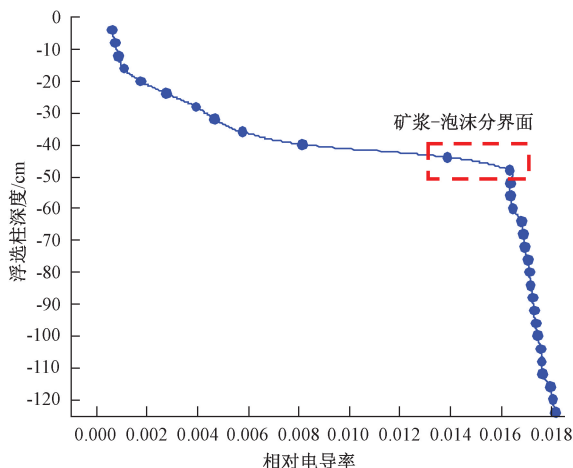


图2 矿浆相对电导率分布曲线

Fig. 2 Pulp relative conductivity distribution curve

由图2可见,在激励源输出恒定时,浮选池内不同深度矿浆的相对电导率不同,在矿浆-泡沫分界面的电导率会出现骤降,能实现对矿浆液位的准确测量。但当激励源输出不稳随负载阻抗变化,通过加电流测电压计算的电导率不可靠,电导率骤降点易出现“超前”、“滞后”或“多处相等”情况,无法准确反应矿浆液位的实际变化。因此,为保证系统液位测量的准确性,设计的激励源电路需具有较强的带负载能力,并在矿浆负载变化范围内实现输出稳定。

1.2 矿浆负载等效阻抗模型

对于矿浆浮选工业现场,系统测量电极所处的浮选池为固(矿物)、液(水)、气(空气)三相流环境,为准确反应矿浆内部的液位高度变化,浮选液位测量电极传感器采用浸入式电极浮选柱,激励方式分为直流激励和交流

激励。但矿浆浮选池由于导电离子的存在表现为一个复杂的电化学系统,存在极化效应,采用直流激励会导致矿浆发生极化效应形成原电池,产生极化电阻,内部电势与激励源电压相反,减小实际测量电压,由此产生测量误差,采用交流激励时,能减弱电极的极化效应,但周期性的电荷变化在电极表面形成的双电层电容和电路杂散电容会影响恒流源输出精度和频率稳定性^[20-21]。

以一对电极为例,矿浆混合物的等效阻抗模型是电阻和电容的串并联,如图3所示。 R_{l0} 、 R_{l1} 为测量导线和模拟通道开关导通电阻, R_1 、 R_2 为电极极化电阻, R_x 为矿浆溶液电阻, C_{p0} 、 C_{p1} 为测量电极表面吸附正负离子产生的双电层电容, C_m 为矿浆中不导电杂质与空气形成的电容, C_{l0} 、 C_{l1} 为导线分布电容。

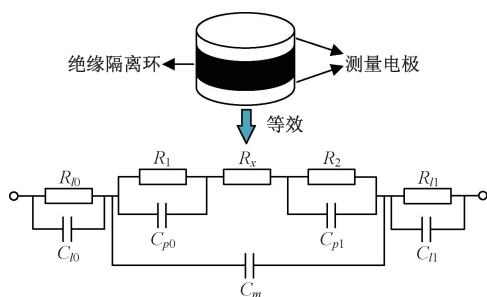


图3 矿浆负载等效阻抗模型

Fig. 3 Equivalent impedance model of pulp load

本文在设计电路时采用交流激励,电极的极化效应减弱,极化电阻 R_1 、 R_2 可忽略不计,导线分布电容 C_{l0} 、 C_{l1} 可以通过补偿电容进行补偿,电容效应在电极表面产生的双电层电容 C_{p0} 、 C_{p1} 一般为 μF 级,而电解质电容 C_m 一般为 pF 级,两者相差较大,双电层电容在交流激励时阻抗可以忽略不计,设负载电容 C_x ,负载电阻为 R_x ,导线和模拟通道开关导通电阻为 R_l ,可得到简化后的矿浆负载等效阻抗模型如图4所示。

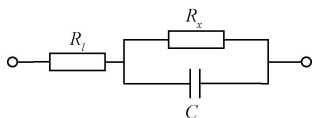


图4 矿浆负载等效阻抗简化模型

Fig. 4 Simplified equivalent impedance model of pulp load

根据简化后的矿浆负载等效阻抗模型,对浮选液位测量硬件系统激励源电路进行设计需求分析。在面对工业实际场景中大型浮选池和复杂环境噪声的干扰时,为确保信号不被噪声覆盖影响测量,要求激励源的精度和幅值较高,但较大的激励电流会导致负载两端具有较高的电压峰值,为使输出信号不发生畸变,激励源需要具有较强的带负载能力和较大的电压输出量^[22-23]。不同矿

粉原料及浓度形成的矿浆表现不同的阻抗特性,考虑电极极化效应和矿浆良好的电导率,实验得到矿浆负载等效阻抗大小范围通常在 $0 \sim 1500 \Omega$ 。由于工业现场存在 $50 \sim 60 \text{ Hz}$ 的工频干扰,激励源信号频率应在 100 Hz 以上,但信号频率过高会导致电容 C_x 的电容效应明显,式(2)中 $\frac{R_x}{1+2\pi f C_x R_x}$ 的阻抗大小趋近于 C_x 的阻抗,溶液总阻抗 Z_t 变化微小,增加了系统液位测量难度,因此激励信号频率上限应保持在 kHz 为最佳。

$$Z_t = R_l + \frac{R_x}{1 + 2\pi f C_x R_x} \quad (2)$$

式中: Z_t 为溶液总阻抗; f 为激励源信号频率。

综上所述,为保证测量电极能准确反应浮选池内部矿浆的阻抗变化,实现后续液位高度和泡沫厚度的准确测量,恒流源需要在 $100 \text{ Hz} \sim 50 \text{ kHz}$ 频率可调、 $0 \sim 20 \text{ mA}$ 恒流。

2 高精度差分恒流源电路设计

2.1 增强型 Howland 电路

增强型 Howland 电路如图5所示,通过引入正负反馈实现恒流,设计结构简单^[24]。

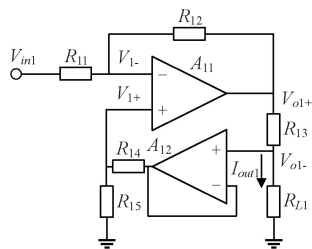


图5 增强型 Howland 电路

Fig. 5 Enhanced Howland circuit

在运算放大器工作在线性区时,放大器 A_{11} 同相端 V_{1+} 和反相端 V_{1-} 可看作“虚短”,流过转换电阻 R_{13} 的电流与流过负载 R_{L1} 的电流相等,输出电流 I_{out1} 则有:

$$I_{out1} = -\frac{R_{12}}{R_{11}R_{13}}V_{in1} + \frac{R_{12}R_{15} - R_{11}R_{14}}{(R_{14} + R_{15})R_{11}R_{13}}V_{o1-} \quad (3)$$

利用诺顿定理可以求得电路的输出阻抗 R_{o1} 为:

$$R_{o1} = \frac{R_{11}R_{13}(R_{14} + R_{15})}{R_{12}R_{15} - R_{11}R_{14}} \quad (4)$$

由式(3)、(4)得到增强型 Howland 电路保持恒流和高输出电阻的阻抗平衡条件为:

$$R_{12}R_{15} = R_{11}R_{14} \quad (5)$$

电路采用负载接地的方式,设 V_{sat} 为运算放大器饱和电压, V_L 为电路输出电压,可得:

$$|V_L| \leq |V_{sat} - R_{13} I_{out1}| \quad (6)$$

在满足平衡条件式(5)条件下,将式(3)代入式(6)整理化简得:

$$|V_L| \leq |V_{sat}| - |V_{in1}| \quad (7)$$

式(7)表明,电路输出电压范围受到输入电压 V_{in1} 的限制,输出电压范围小、电压柔量低、带负载能力差,在电流与负载较大时,电路输出会产生失真。

同时,Howland 电路中正负反馈的存在会导致电路在负载较大时,易发生自激振荡,且电路没有引入“虚地”,会受到来自地平面的共模噪声干扰,影响输出电流精度,没有对杂散电容和寄生电容进行补偿,导致电路高频稳定性差。

2.2 Tietze 电路

Tietze 基本电路如图 6 所示,由两个运算放大器形成两级负反馈,级联配置 6 个电阻构成^[12-13]。

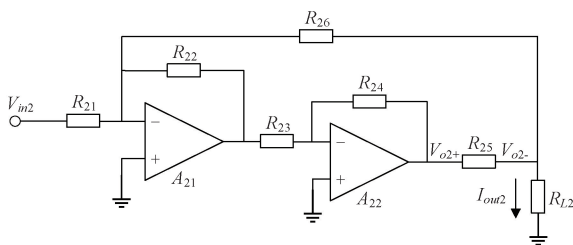


图 6 Tietze 电路

Fig. 6 Tietze circuit

根据叠加原理得到输出电流 I_{out2} 为:

$$I_{out2} = \frac{R_{22}R_{24}}{R_{21}R_{23}R_{25}}V_{in2} + \frac{R_{22}R_{24} - R_{23}R_{26}}{R_{23}R_{25}R_{26}}V_{o2-} \quad (8)$$

利用诺顿定理可求得电路的输出阻抗 R_{o2} 为:

$$R_{o2} = \frac{R_{23}R_{25}R_{26}}{R_{22}R_{24} - R_{23}(R_{25} + R_{26})} \quad (9)$$

式(8)、(9)表明,电路的阻抗匹配条件不一致,最外一级反馈电阻 R_{26} 不可避免会产生无功功耗和电流分流,造成输出电流不稳定。为减小上述影响,反馈电阻 R_{26} 通常很大,但增大 R_{26} 会降低电路速度和精度,增加电阻匹配难度,且电路采用与 Howland 电路相同的负载接地方式,电压输出柔量低,带负载能力差。

2.3 改进型 Tietze 电路

针对 Howland 电路和 Tietze 电路存在的问题,本文设计了一种基于 Tietze 电路的新型高精度差分恒流源电路,改进后电路如图 7 所示。

为改善电路反馈回路分流的情况,在 Tietze 电路最外一级反馈回路中引入电压跟随器 A_{34} 以提高电路速度,利用运放输入电阻无穷大的特性降低无功功耗、减小反馈电阻 R_{37} 分流,改进后电路输出电流 I_{out3} 为:

$$I_{out3} = \frac{R_{33}R_{35}}{R_{32}R_{34}R_{36}}V_{in3} + \frac{R_{33}R_{35} - R_{34}R_{37}}{R_{34}R_{36}R_{37}}V_{o3} \quad (10)$$

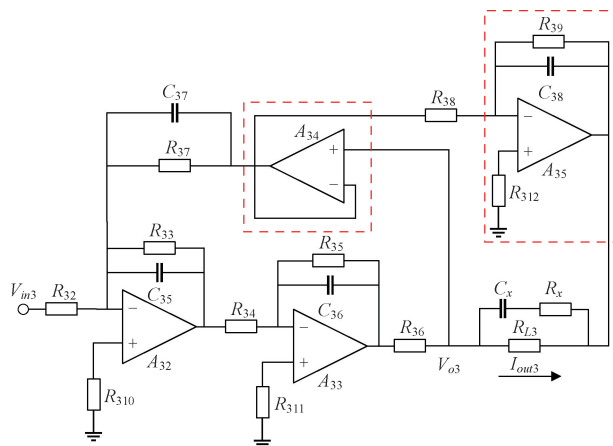


图 7 改进型 Tietze 电路

Fig. 7 Improved Tietze circuit

为改善电路输出电阻的阻抗平衡条件,增大电路的输出阻抗、电压柔量及带负载能力,减小地平面共模噪声干扰对电路输出精度的影响,引入运算放大器 A_{35} 构成负反馈电路实现对负载的浮地连接,在相同条件下,利用诺顿定理求得改进后输出阻抗 R_{o3} 扩大了 $(R_{39} + R_{38})/R_{38}$ 倍:

$$R_{o3} = \frac{R_{33}R_{35}R_{36}(R_{38} + R_{39})}{R_{38}(R_{33}R_{35} - R_{34}R_{37})} \quad (11)$$

由式(10)、(11)得到改进后电路具有一致的阻抗平衡条件为:

$$R_{33}R_{35} = R_{34}R_{37} \quad (12)$$

当电路满足阻抗平衡条件,且 $R_{32} = R_{33} = R_{34} = R_{35}$ 时,电路输出阻抗无穷大,输出电流 I_{out3} 仅与输入电压 V_{in3} 和取样电阻 R_{36} 有关,不会受到负载两端电压 V_{o3} 影响,电路具有更高的精度和稳定性,简化后的电路输出电流 I_{out3} 为:

$$I_{out3} = \frac{V_{in3}}{R_{36}} \quad (13)$$

对电路的电压输出柔量进行分析,负载采用浮地连接后,电路的电压输出柔量相对于式(7)扩大了 2 倍,电压输出范围更广,具有更强的带负载能力:

$$|V_L| \leq 2(|V_{sat}| - |V_{in3}|) \quad (14)$$

同时,为改善电路高频特性,在反馈回路中引入补偿电容 $C_{35} \sim C_{38}$ 和 C_x ,对电路杂散电容和寄生电容进行补偿,增加电路相位裕度以提高电路的高频稳定性,引入零点进行超前补偿以减小运放对输出信号的相移。

3 仿真实验结果与分析

3.1 电路带载能力仿真对比实验

本文为了验证电路的带载能力,根据电压输出柔量(式(7)和(14)),通过仿真软件 LTspice 对增强型

Howland 电路、Tietze 电路及改进型 Tietze 电路进行验证分析,对负载 R_L 在 $0 \sim 4\text{ k}\Omega$ 范围内进行扫描分析,步长为 $1\text{ k}\Omega$,输入信号振幅为 8 V ,频率为 50 kHz ,选取有效值 11.094 mA 作为设定值,电路仿真输出波形如图 8 所示。

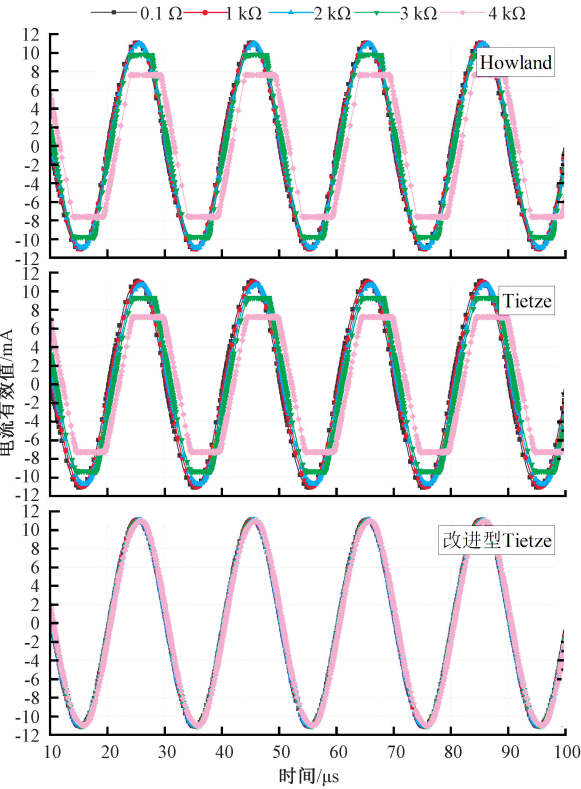


图 8 电路仿真输出波形

Fig. 8 Circuit simulation output waveform

由图 8 可见,Howland 电路和 Tietze 电路的输出波形都受到负载影响而产生明显相移,在负载较大时,输出波形甚至出现斩波,带负载能力差。而本文设计的改进型 Tietze 电路由于存在补偿电容,引入零点进行超前补偿,输出波形相移小,且采用浮地连接负载,电路在测量范围内输出波形不会被斩波,带负载能力强。

对负载范围进一步细分,设置步长为 $250\text{ }\Omega$,仿真得到电路输出电流有效值随负载变化的特性曲线如图 9 所示。仿真结果表明,Howland 电路和 Tietze 电路在频率恒定时,输出电流有效值随负载增大而下降明显,而本文设计电路在负载 $4\text{ k}\Omega$ 时,输出电流仍能维持稳定,受负载影响小,输出精度和稳定性更高。

3.2 电路频率特性仿真对比实验

本文同时对 3 种电路的频率特性进行了仿真验证,取负载恒定 $1\text{ k}\Omega$,对输入信号频率在 $100\text{ Hz} \sim 100\text{ kHz}$ 范围内进行 10 倍频程扫频分析,振幅为 8 V ,选取有效值

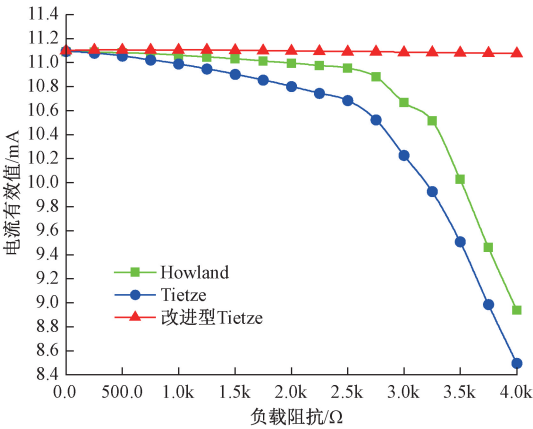


图 9 电路随负载变化的输出特性曲线

Fig. 9 Output characteristic of circuit under varying load

11.094 mA 作为设定值,电路输出电流有效值随频率变化的特性曲线如图 10 所示。

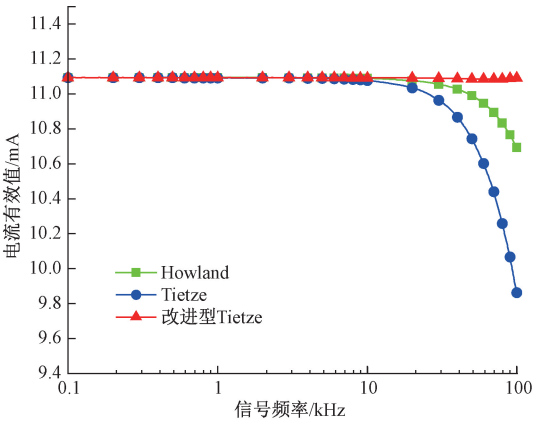


图 10 电路随频率变化的输出特性曲线

Fig. 10 Output characteristic of circuit under varying frequency

由图 10 可见,Howland 电路和 Tietze 电路在负载恒定时,电路输出电流在频率到达 10 kHz 后明显下降,无法恒流,高频特性差,而本文设计的电路在频率为 100 kHz 时,电路输出电流仍能保持稳定,高频特性好。

3.3 电路输出阻抗仿真对比实验

输出阻抗作为衡量恒流源输出精度和稳定性的重要指标,电流源输出阻抗与信号频率的关系通常用于表征电流源的优劣^[11]。理想恒流源的输出阻抗无穷大,电路不会产生分流,所有电流都流经负载,输出电流稳定,为此对上述 3 种电路进行不同频率下电路输出阻抗的仿真实验,其实验结果如图 11 所示。

由图 11 可见,电路输出阻抗随着频率升高而降低,但相较于 Howland 电路和 Tietze 电路,本文设计的改进

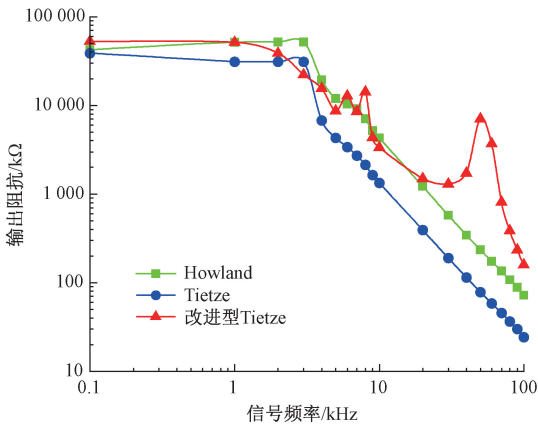


图 11 电路仿真输出阻抗

Fig. 11 Simulation output impedance of the circuit

型电路由于在反馈回路中引入了补偿电容 C_{35} 、 C_{36} 、 C_{37} 、 C_{38} 与 C_x , 增加了电路的相位裕度, 提高了在信号频率为 50 kHz 情况下的电路输出阻抗, 所以输出电阻在 50 kHz 处出现一个增加的过程, 保证了电路在 50 kHz 高频段也具有 1.2 MΩ 以上的高输出阻抗, 且当信号频率增加到 100 kHz 时, 输出阻抗仍能够保持在 150 kΩ 左右, 电路整体输出阻抗得到了明显的提高。

结合电路仿真实验与系统激励信号频率和幅值范围, 对恒流源运放从增益带宽积 (GBP)、输出电流、工作电压及压摆率 (SR) 角度进行考虑, 有:

$$\begin{cases} f_{\max} = 50 \text{ kHz} \\ I_{\max} = 20 \text{ mA} \\ R_{\max} = 1\,500 \, \Omega \\ |V_{\max}| \geq \sqrt{2} I_{\max} R_{\max} = 30\sqrt{2} \text{ V} \\ SR_{\min} \geq 2\pi f_{\max} V_{\max} \approx 13.32 \text{ V}/\mu\text{s} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $f_{\max}$ 为信号最大频率; $I_{\max}$ 为电路最大激励电流; $R_{\max}$ 为矿浆负载最大阻抗; $V_{\max}$ 为电路最大峰值电压; $SR_{\min}$ 为运放最小压摆率。因此, 选取高压、精密运放 ADA4700 作为电路运放为最佳, 其具有最高 $\pm 50 \text{ V}$ 的宽工作电压范围, 30 mA 的输出驱动电流, 增益带宽积 3.5 MHz, 压摆率 20 V/ μs , 接近轨到轨的输出摆幅能力。

由仿真实验效果得知, 为保证电路输出电流受负载阻抗及信号频率影响小, 电阻值和电容值要严格选取, 电阻选用精度为 0.1% 的低温漂、高精度贴片电阻, 匹配电阻取 $R_{32}=R_{33}=R_{34}=R_{35}=R_{37}=R_{38}=R_{39}=10 \text{ k}\Omega$ 效果最佳, 电流取样电阻 $R_{36}=510 \, \Omega$, 偏置电阻 $R_{310}=3.3 \text{ k}\Omega$ 、 $R_{311}=R_{312}=5 \text{ k}\Omega$, 保护电阻 $R_x=150 \text{ k}\Omega$; 电容选用耐高温、高频特性好的 X7R 贴片陶瓷电容, 补偿电容最佳方案为 $C_{37}=16 \text{ pF}$ 、 $C_x=10 \text{ pF}$ 、 $C_{35}=C_{36}=C_{38}=2.5 \text{ pF}$ 。

4 实际测试

4.1 实验平台与测试方案

为测试恒流源电路在实际矿浆液位测量系统中的整体性能, 本文使用 Altium Designer 绘制矿浆浮选液位测量整体方案原理和 PCB, 完成制版、焊接及调试工作, 嵌入式硬件平台恒流源部分电路原理与实物如图 12、13 所示。信号发生器部分通过 DDS 芯片和数字电位器电路产生频率在 100 Hz~50 kHz 可调幅交变电压信号, 电源部分产生正负 50 V 电压给压控恒流源运放 ADA4700 供电, 压控恒流源部分实现电路在 0~20 mA 范围内恒流。

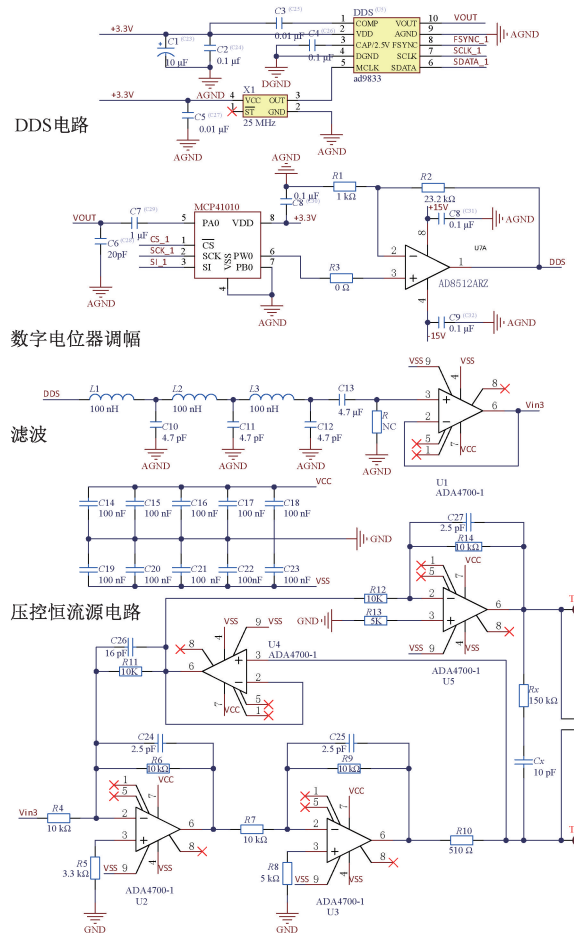


图 12 改进型 Tietze 恒流源电路原理

Fig. 12 Improved Tietze current source circuit schematic

本文使用设计的矿浆浮选液位测量嵌入式硬件平台搭建实际测试平台如图 14 所示, 选取带宽 200 MHz, 采样率 2.5 GS/s 的 Tektronix MDO34 示波器观测信号质量, UNI-TUT805 A 台式高精度万用表测量负载 R_L 上的电流有效值, 迈胜 MS-303D 开关电源为系统供电, 电阻箱模拟工业现场实际浮选动态变化过程中某一时刻的矿浆负载阻抗。

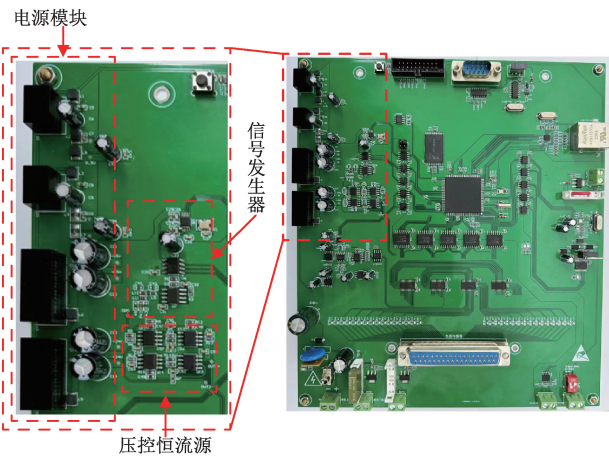


图 13 嵌入式硬件平台恒流源实物

Fig. 13 Embedded hardware platform constant current source material

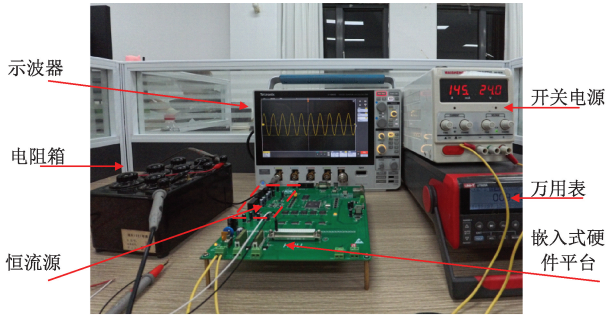


图 14 实际测试平台

Fig. 14 Actual test platform

由实际测试分析得知,本文设计的新型恒流源电路误差主要来源于测量长导线和电路板存在的寄生电容和杂散电容,电路中用于阻抗匹配电阻存在的阻值偏差以及各部分功能电路间的级间串扰。为此,本文采用模块化的设计,在整体样机设计时各部分功能电路间增加隔直电容或电压跟随器实现前后级隔离,据此减少级间串扰,并采用引入补偿电容的方式对电路和导线的寄生电容和杂散电容进行补偿,电容选用耐高温、高频特性好的 X7R 贴片陶瓷电容,容值大小为 0~20 pF,匹配电阻选用精度为 0.1% 的低温漂、高精度贴片电阻,阻值大小为 1~20 k Ω ,以降低电路功耗以及阻值偏差,并分别从负载特性、频率特性及输出阻抗方面对恒流源输出性能进行实际测试。

4.2 实际测试结果

本文选取输入信号振幅为 8 V,频率为 50 kHz,100 Ω 负载情况下的电流有效值作为设定值,负载阻抗从 100 Ω 逐渐增加至 4 k Ω ,各恒流源在不同负载下输出电流有效值测试结果如表 1 所示。

表 1 不同负载下输出电流有效值

Table 1 Effective output current values under different loads

负载阻抗 / Ω	Howland 测量 有效值/mA	Tietze 测量 有效值/mA	改进型 Tietze 测量有效值/mA
100	11.087	11.070	11.101
200	11.086	11.036	11.101
300	11.086	11.003	11.100
400	11.085	10.962	11.100
500	11.084	10.920	11.099
600	11.082	10.869	11.097
700	11.080	10.815	11.096
800	11.076	10.758	11.095
900	11.073	10.700	11.093
1 000	10.962	10.512	11.093
1 500	10.947	10.216	11.087
2 000	10.564	9.747	11.077
2 500	10.551	9.519	11.071
3 000	10.414(畸变)	9.226(畸变)	11.068
3 500	10.121(畸变)	8.978(畸变)	11.065
4 000	9.600(畸变)	8.773(畸变)	11.059
最大相对误差/%	4.834	14.011	0.378

由表 1 可知,在矿浆阻抗 0~1 500 Ω 范围内,Howland 电路输出最大相对误差为 1.263%,Tietze 电路输出最大相对误差为 7.715%,而本文改进型 Tietze 电路输出最大相对误差低至 0.126%。Howland 和 Tietze 电路在负载阻抗增加至 3 k Ω 时,由于电路带负载能力不够,输出波形发生畸变,输出电流明显下降,最大相对误差分别为 4.834%和 14.011%,而本文改进型 Tietze 电路采用浮地结构,带负载能力强,在负载 4 k Ω 下电路输出波形仍然稳定,并可保持较高的电流输出精度,最大相对误差低至 0.378%,满足矿浆浮选工业现场的实际激励工作要求。

通过对表 1 的离散数据整理拟合得到随负载变化的电路输出电流特性曲线如图 15 所示。相较于 Howland 和 Tietze 电路,本文设计的改进型 Tietze 电路的实际负载特性更好,随着负载阻抗逐渐增大,电路输出电流基本保持不变,输出精度和稳定性更高。

本文进一步对 3 种电路的频率特性进行实际测试,选取输入信号振幅为 8 V,负载阻抗为 1 500 Ω ,频率 100 Hz 情况下的电流有效值作为设定值,输入信号频率从 100 Hz 逐渐增加至 100 kHz,各恒流源在不同频率下输出电流有效值测试结果如表 2 所示。

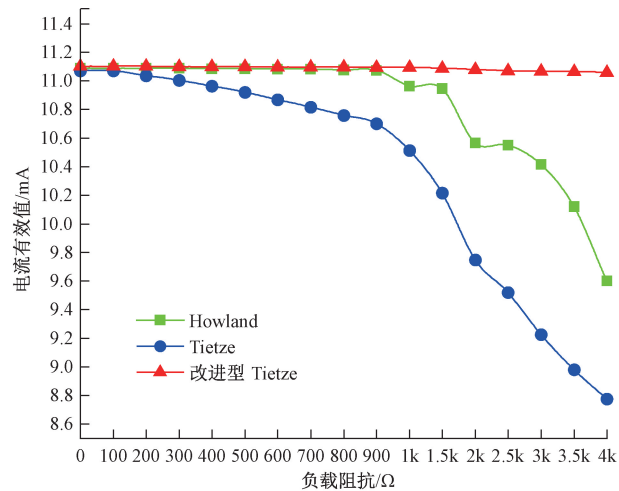


图 15 不同负载下输出电流有效值拟合
Fig. 15 Output current RMS fitting at different loads

表 2 不同频率下输出电流有效值

Table 2 Effective output current values at different frequencies			
信号频率 /kHz	Howland 测量有效值/mA	Tietze 测量有效值/mA	改进型 Tietze 测量有效值/mA
0.1	11.157	11.138	11.120
1	11.142	11.132	11.117
2	11.138	11.126	11.114
3	11.136	11.122	11.111
4	11.134	11.117	11.110
5	11.132	11.115	11.109
6	11.131	11.109	11.109
7	11.131	11.103	11.108
8	11.130	11.098	11.108
9	11.130	11.092	11.109
10	11.129	11.085	11.108
20	11.113	11.074	11.105
30	11.067	10.804	11.094
40	10.997	10.596	11.079
50	10.916	10.216	11.071
100	10.387	9.287	11.063
最大相对误差/%	6.901	16.619	0.513

由表 2 可知,电路输出电流随着频率升高而减小。在输入信号 100 Hz~100 kHz 范围内,Howland 电路输出最大相对误差为 6.901%,Tietze 电路输出最大相对误差为 16.619%,而本文改进型 Tietze 电路在反馈回路中引入补偿电容,对电路杂散电容和寄生电容进行补偿,提高

了系统的高频稳定性,电流输出有效值最大绝对误差为 0.057 mA,输出最大相对误差低至 0.513%。

通过对表 2 的离散数据整理拟合得到随频率变化的电路输出电流特性曲线如图 16 所示。由图 16 可以看出,本文改进后的 Tietze 电路在测试频段内保持良好的电流输出能力,频率稳定性较好,输出精度较高,满足矿浆浮选工业现场矿浆对于激励源不同频率的测量需求,提高了整个测量系统的适用性。

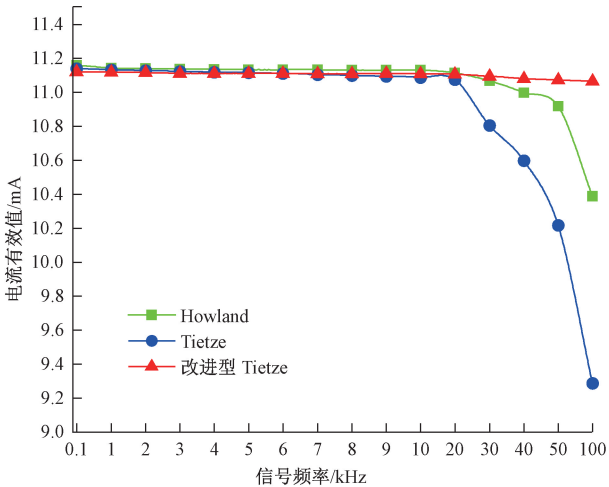


图 16 不同频率下输出电流有效值拟合
Fig. 16 Output current RMS fitting graph at different frequencies

为进一步评估恒流源的性能,实际测量两组不同负载下电流的有效值,计算得到电路的输出阻抗为:

$$R_o = \left| \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2} \right| \tag{16}$$

式中: R_1 选取 100 Ω ; R_2 选取 1 500 Ω ; I_1 、 I_2 为其对应的电流有效值; R_o 为输出阻抗。恒流源输出阻抗的实际测试结果如图 17 所示。

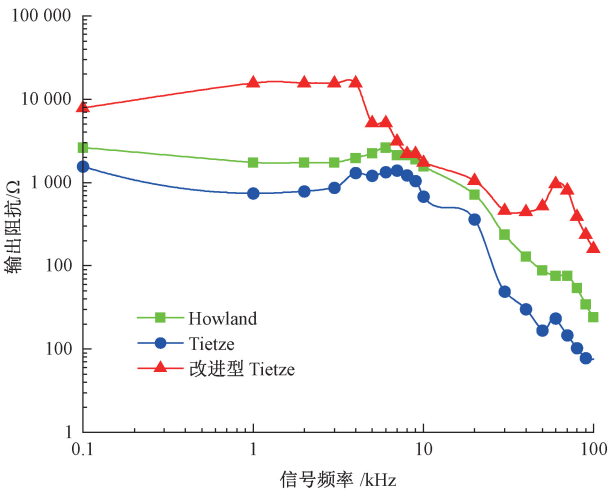


图 17 电路实际输出阻抗
Fig. 17 Actual output impedance of the circuit

由图 17 可见,由于 PCB 布板、布线存在寄生电容以及整体系统板间干扰的存在,电路实际输出阻抗相对于仿真有所下降,但输出阻抗曲线总体趋势与仿真相符,且从图 17 可知,本文改进后的电路输出阻抗相对于未改进前依然得到了明显提升,在信号频率为 50 kHz 时,Howland 电路和 Tietze 电路输出阻抗均低于 100 k Ω ,而本文改进后的电路输出阻抗趋于 516 k Ω 。随着频率升高,Howland 电路和 Tietze 电路的输出阻抗显著下降,在信号频率为 100 kHz 时,输出阻抗低于 25 k Ω ,而本文改进后的电路输出阻抗仍保持在 150 k Ω 。

综上所述,恒流源在整体浮选液位测量系统中负载特性、频率特性以及输出阻抗 3 个方面的测试结果表明,本文提出的改进型 Tietze 电路在仿真和实际测试中电流输出精度和稳定性方面都具有更好的输出性能,能在矿浆负载范围内实现 100 Hz~50 kHz 频率可调、0~20 mA 幅值范围内电流恒定,更加适用于矿浆浮选工业现场。

5 结 论

针对矿浆浮选工业液位测量系统中恒流源的实际电路设计输出精度低、高频特性及带负载能力差等缺点,本文设计了一种新型高精度差分恒流源电路,并制作整体样机实物进行了实际测试与检验。实际测试结果表明,本文设计的改进恒流源能在 0~4 k Ω 负载范围内实现 100 Hz~50 kHz 频率可调、0~20 mA 幅值范围内电流恒定,电路频率特性和负载特性较好,其最大相对误差分别为 0.513% 和 0.378%,在电流输出精度和稳定性方面具有更高的性能,并通过实际应用于浮选现场矿浆液位测量系统,提高了矿浆液位测量精度,由此提升了整体矿浆浮选效率和最终产品质量。

参考文献

[1] 高文字,冯中爱,仇庆敏,等. 浮选泡沫环境下液位检测装置的设计与应用[J]. 选煤技术, 2021(3): 86-90.

GAO W Y, FENG ZH A, QIU Q M, et al. Design and application of liquid level detection device in flotation foam environment [J]. Coal Preparation Technology, 2021 (3): 86-90.

[2] 顾幅华,李青柯,巫鑫东,等. 微细粒矿物浮选技术在磨矿-调浆-分选体系的研究进展[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 40-43.

GU G H, LI Q K, WU L D, et al. Research progress of fine mineral flotation technology in grinding, pulp mixing and separation system [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2023, 43(2): 40-43.

[3] HUANG J J, ZHOU T, WANG CH, et al. Design of a high linearity sinusoidal current generator using shifting current mirror architecture [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 4008905.

[4] LIANG CH Q, LYU D SH, YANG X Y. Design of CNC constant current source based on incremental PID control [C]. Second International Conference on Electronic Information Technology, 2023: 12719.

[5] ABDELWAHAB A, SHISHVAN O R, SAULNIER G J. A modified howland current source design for simultaneous EIT/ECG data acquisition [J]. International Journal of Bio Electromagnetism, 2022, 24(1): 208-212.

[6] MENDEN T, MATUSZCZYK J, LENOHARDT S, et al. Bandwidth and common mode optimization for current and voltage sources in bioimpedance spectroscopy [J]. Journal of Electrical Bioimpedance, 2021, 12(1): 135-146.

[7] BOUCHAALA D, SHI Q H, CHEN X Y, et al. A high accuracy voltage controlled current source for handheld bioimpedance measurement [C]. 2013 10th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD), 2013: 1-4.

[8] SINGH P, DHANOA A K. A novel current mirror and its application as voltage controlled current source [C]. 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), 2015: 1-4.

[9] PUSPITASARI A J, ENDARKO. Study of precision constant current sources with resistor load and a cole-cole load for multi-frequency in electrical impedance tomography [C]. 2016 International Seminar on Sensors, Instrumentation, Measurement and Metrology (ISSIMM), 2016: 12-17.

[10] YANG X D, XU Y B, DONG F. A FPGA-based multi-frequency current source for biological EIT system [C]. 2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2016, 2: 1195-1200.

[11] 张洪川,滕召胜,林海军,等. 低功耗单电源压控精密恒流源设计 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2678-2682.

ZHANG H CH, TENG ZH SH, LIN H J, et al. Design of low power consumption single voltage controlled precision constant current source [J]. Chinese Journal of

- Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2678-2682.
- [12] BOUCHAALA D, KANOUN O, DERBEL N. High accurate and wideband current excitation for bioimpedance health monitoring systems[J]. Measurement, 2016, 79: 339-348.
- [13] 黄潇, 唐求, 周朝霞, 等. 用于生物电阻抗谱测量的程控宽频恒流源设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 145-153.
- HUANG X, TANG Q, ZHOU ZH X, et al. Design of programmable wideband constant current source for bioelectrical impedance spectroscopy [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4): 145-153.
- [14] 盘书宝. 三维磁场模拟六通道高精度恒流源设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(10): 158-162.
- PAN SH B. Design and implementation of six-channel high-precision current source for 3D magnetic field simulation [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(10): 158-162.
- [15] NOURI H, BOUCHAALA D, GARGOURI R, et al. Stability analysis for howland current source for bioimpedance measurement [C]. 2021 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2021: 1-6.
- [16] HAO L I U, JUN W, KAN Z, et al. Research and fabrication of a device for conductivity measurement of hydro-carbone oil products[J]. Experiment Science and Technology, 2024, 22(3): 125-129.
- [17] 丁志杰, 吕明召, 赵志伟. 压控恒流源的动态性能研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 6-9.
- DING ZH J, LYU M ZH, ZHAO ZH W. Study on dynamic performance of voltage controlled constant current source[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(9): 6-9.
- [18] 戴冬冰, 冯冬梅, 张军, 等. 高精度大功率恒流源在微小电阻测试中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(5): 173-178.
- DAI D B, FENG D M, ZHANG J, et al. Application of high-precision and high-power constant current source in micro-resistance measurement [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(5): 173-178.
- [19] 李文彬, 王圣捷, 朱平杰, 等. 多分立电流源低噪声 JFET 差分放大技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 134-141.
- LI W B, WANG SH J, ZHU P J, et al. Research on differential amplification technology of multi-discrete current source low noise JFET[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 134-141.
- [20] WU J, BAI W, ZHANG L, et al. Design of a portable electrochemical impedance spectroscopy measurement system based on AD5941 for lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 84: 110856.
- [21] 莫恭防, 韩鹏, 玉升灿, 等. 基于同步整流技术的高效率恒压恒流电源[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(12): 102-107.
- MO G F, HAN P, YU SH C, et al. High efficiency constant voltage and constant current power supply based on synchronous rectification technology [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(12): 102-107.
- [22] 王松, 刘凯, 朱天明, 等. 面向生物阻抗测量的双通道反馈电流源设计[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 204-212.
- WANG S, LIU K, ZHU T M, et al. Design of dual-channel feedback current source for bio-impedance measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 204-212.
- [23] 鞠康, 何为, 何传红, 等. 基于直接数字频率合成的混合频率恒流源设计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2109-2114.
- JU K, HE W, HE CH H, et al. Design of mixing frequency constant current source based on direct digital synthesizer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(9): 2109-2114.
- [24] DIMAS C, ALIMISIS V, GEORGAKOPOULOS I, et al. Analysis, simulation, and development of a low-cost fully active-electrode bioimpedance measurement module[J]. Technologies, 2021, 9(3): 9030059.

作者简介



陈启标, 2021 年于武汉工程大学获得学士学位, 2024 年于湖南大学获得硕士学位, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: chenluoyou@163.com

Chen Qibiao received his B.Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 2021, M. Sc. degree from Hunan University in 2024. His main research interest is intelligent detection technology.



检测技术。

E-mail: gaoyp@hnu.edu.cn

Gao Yunpeng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hunan University in 2001, M. Sc. degree from Hunan University in 2004, and Ph. D. degree from Hunan University in 2009. Now he is a Full-time professor and Ph. D. supervisor at Hunan University. His main research interests include intelligent information processing and intelligent detection technology.



E-mail: tsyang@hnu.edu.cn

Yang Tangsheng received his B. Sc. degree from Hohai

高云鹏 (通信作者), 2001 年于湖南大学获得学士学位, 2004 年于湖南大学获得硕士学位, 2009 年于湖南大学获得博士学位, 现为湖南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能信息处理、智能

University in 1990, M. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2002, and Ph. D. degree from Wuhan University of Technology in 2005. Now he is an associate professor at Hunan University. His main research interests include intelligent detection, microbial sensing and detection.



李曦婷, 2021 年于湘潭大学获得学士学位, 2024 年于湖南大学获得硕士学位, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: ynyxlt@163.com

Li Xiting received her B. Sc. degree from Xiangtan University in 2021, M. Sc. degree from Hunan University in 2024. Her main research interest is intelligent detection technology.



王新宇, 2022 年于武汉工程大学获得学士学位, 现为湖南大学硕士研究生, 主要研究方向为智能检测技术。

E-mail: 13227380052@163.com

Wang Xinyu received his B. Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at Hunan University. His main research interest is intelligent detection technology.