

一种改进型微弱电流低噪声放大应用电路

姜利英, 岳保磊, 梁茂, 周鹏磊, 肖小楠

(郑州轻工业学院 电气信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要:针对微弱电流信号检测技术存在的背景噪声、电路噪声、元器件噪声等的干扰往往大于信号本身,从而影响测量结果准确性的问题,设计了一种微弱电流低噪声信号放大应用电路.该设计采用高精度、小阻值的反馈电阻和高性能运算放大器 AD795 对 T 型 I/V 转换电路进行改进,选用高性能分立元件搭建前置放大电路,进而基于调制-解调原理设计锁相放大电路.软件仿真结果表明,电路具有较强的噪声抑制能力和稳定性,可以满足各种传感器微弱信号的测量要求.

关键词:微弱电流;低噪声;T型 I/V 转换;前置放大;锁相放大

中图分类号:TP216 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2015.3/4.026

An improved weak current low noise amplifier application circuit

JIANG Li-ying, YUE Bao-lei, LIANG Mao, ZHOU Peng-lei, XIAO Xiao-nan

(College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to solve the problem in weak current signal detection technology that the interference of background noise, circuit noise and component noise is stronger than signal itself, a weak current low noise amplifier application circuit was designed. The model improved T-type I/V conversion circuit by adopting high precision and small resistance value feed back resistance and high performance operational amplifier AD795, set up preamplifier circuit by high performance discrete elements and designed phase-locked amplifier circuit based on modulation and demodulation principle. The simulation analysis showed that the circuit had higher noise suppression capability and stability and could meet the weak current measurement requirement of various sensors.

Key words: weak current; low noise; T-type I/V conversion; preamplifier; phase-locked amplifier

0 引言

随着传感器及检测技术的发展,微弱电流检测技术在许多领域都展示了广泛的应用前景,例如核酸适体浓度、光电信号、小位移、微流量、微振动等,其检测都要通过相应的传感器将其转化为微电流信号,再经过放大器放大显示被测量信号的大小^[1].但测量中产生的背景噪声、电路噪声和元器

件噪声的干扰往往大于微弱电流信号本身,从而影响测量结果的准确性.因此,高精度低噪声放大电路的设计非常必要.

传统的微弱电流放大应用电路受温度漂移和噪声影响较大,制约着高灵敏度自动化仪表及检测装置的运用和发展.本文拟针对传统微弱电流放大应用电路的误差成因,根据低噪声原则,在对 T 型 I/V 转换电路、前置放大电路进行改进的基础上,基

于调制-解调原理设计锁相放大电路,从而构成改进型微弱电流低噪声放大应用电路,以实现经过该放大电路的噪声均能达到各种被测信号放大处理标准的目的。

1 T型 I/V 转换电路

传统的 I/V 转换电路由运算放大器和反馈电阻 R_f 并联组成,如图 1 所示,输出电压 $V_{out} = -I_{in} R_f$,反馈电阻和运算放大器决定了 I/V 转换能力和转换精度。

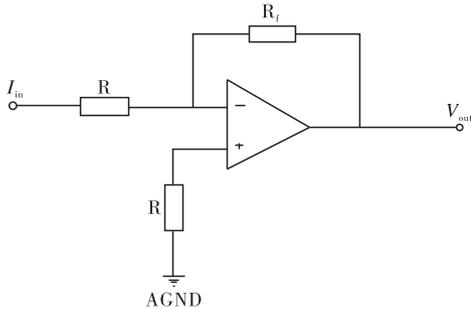


图 1 传统 I/V 转换电路图

图 1 所示的 I/V 转换电路在实际运用中运算放大器的性能达不到理想状态:受失调电压 U_{10} ,失调电流 I_{10} ,输入偏置电流 I_{1B} ,以及温度漂移的影响而产生误差^[2]。误差影响分析模型等效电路如图 2 所示。

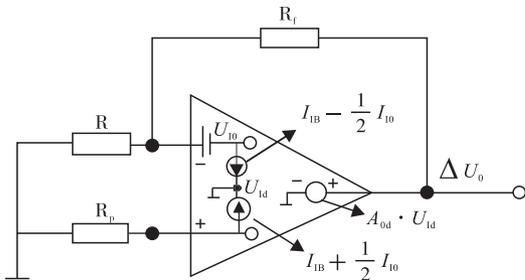


图 2 误差影响分析模型等效电路图

利用平衡电阻 $R_p = R/R_f$,并采用调零电路适当改变 I_{10} ,可以消除 I_{1B}, I_{10}, U_{10} 所带来的误差,但失调电压温度漂移 ΔU_{10} 和失调电流温度漂移 ΔI_{10} 所引起的误差是导致 I/V 转换电路出现误差的原因,其输出误差电压^[3]

$$\Delta U_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) (\Delta U_{10} - R_p \Delta I_{10}) \quad (1)$$

其中, $\Delta U_{10} = \frac{dU_{10}}{dT} \Delta T, \Delta I_{10} = \frac{dI_{10}}{dT} \Delta T$,整理①式得到最大误差电压值为

$$\Delta U_{0max} = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) \left| \frac{dU_{10}}{dT} \Delta T \right| + R_f \left| \frac{dI_{10}}{dT} \Delta T \right| \quad (2)$$

根据式②可知,降低 $\Delta U_{10}, \Delta I_{10}$ 和 R_f 的值,可以有效减少 ΔU_{0max} 。为了提高 I/V 电路的转换能力,应增大 R_f 值,但较大的阻值会产生精度降低、温度漂移加大、噪声干扰增强等现象。选用高性能(失调温漂较小)的运算放大器能降低 ΔU_{10} 和 ΔI_{10} ,从而降低 ΔU_{0max} ,但降低 R_f 值又会影响 I/V 转换能力。

采用高精度、小阻值的反馈电阻和高性能运算放大器 AD795 对传统的 I/V 转换电路进行改进,得到图 3 所示的微弱电流 T 型 I/V 转换电路,该电路可满足电流转换电压后的幅度要求。

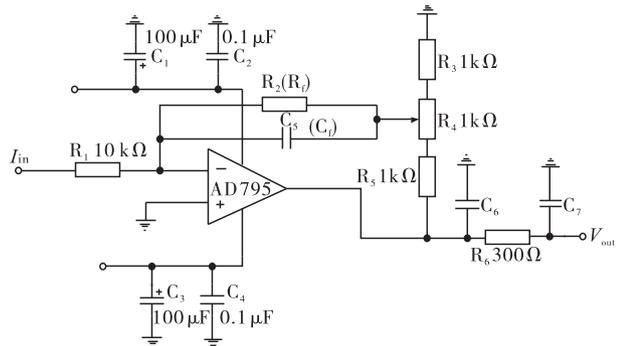


图 3 改进的微弱电流 T 型 I/V 转换电路图

该电路的总反馈电阻

$$R = -\frac{R_2 + R'_4 + R_5}{R_1} \left[1 + \frac{R_2 // (R''_4 + R_5)}{R_3 + R_4} \right]$$

其中, R'_4 表示 R_4 上半部分电阻, R''_4 表示 R_4 下半部分电阻, R_2 的输出端接到电阻分压器 R_4 上,构成了部分负反馈。图 3 电路采用小阻值的电阻就可以得到足够大的反馈电阻,解决传统 I/V 转换电路中 R_f 过大导致的温度漂移误差和噪声干扰问题。在电阻 R_2 上并联的积分电容 C_5 有抑制瞬间电磁干扰和相位补偿的作用,电容值的选择要适当,太小会影响电路的低频特性,太大会增大反应时间^[4]。 C_6, C_7, R_6 构成 Π 型滤波器以平滑输出电压,降低干扰和噪声。

2 前置放大电路

微弱信号的放大和转化需要多级电路级联才能实现,根据费里斯公式

$$F = F_1 + (F_1 - 1)/K_1 + (F_2 - 1)/(K_1 \times K_2) + \dots + (F_n - 1)/(K_1 \times K_2 \times \dots \times K_n) \quad (3)$$

可知,放大电路的性能主要取决于前置级,降低前置级噪声系数,整个微电流检测系统就可获得良好的低噪声性能。式③中, F 表示系统噪声, F_i 表示各级放大电路的噪声系数 ($i = 1, 2, \dots, n - 1$), K_i 表示

每一级放大电路的功率增益^[5]。

传统的前置放大电路与图 1 所示的 I/V 转换电路相似,只是把输入电流 I_{in} 变为输入电压 U_{in} . 放大电路的放大倍数 $A_u = -R_f/R$, 由于传感器输出的是微弱信号,故放大倍数要求较大. 在 R 不能减小的情况下,要提高放大倍数就必须增加 R_f 的值,假如输入电阻 $R = 100\text{ k}\Omega$,前置放大电路放大倍数要达到 10 倍以上, R_f 的值至少为 $1\text{ M}\Omega$,超过 $1\text{ M}\Omega$ 的电阻精度很差、噪声较高,会产生较大的测量误差,同时传统的放大电路对共模噪声信号的抑制能力也较差.

鉴于传统放大电路存在的缺点,选用高性能的分立元件搭建了前置级放大电路如图 4 所示.

图 4 所示电路中,电阻选用精度为 $\pm 0.1\%$ 的金属膜电阻且阻值都不超过 $100\text{ k}\Omega$;电容选用聚丙烯电容(CBB),CBB 频率特性优异(频率响应宽广),而且介质损失很小;场效应管选用热稳定性好、输入阻抗高、噪声系数小的 JEET 型^[6]. C_6, D_1, D_2, D_3, D_4 构成滤波限幅电路,输入信号通过电容滤除其中的直流分量,不让直流信号影响场效应管的静态工作点,同时限制输入电压值,防止信号过大烧毁器件,限幅电路将输入电压控制在 $\pm 0.6\text{ V}$ 之内. 性能相同的 JEET 型场效应管 Q_1 和 Q_2 构成差分式放大电路,无论是温度变化、噪声干扰,还是电源电压的波动都会引起两管漏极电流变化,差分电路的对称性对共模干扰具有很强的抑制作用,从而抑制零点

漂移. Q_4 形成共集电极放大电路,对信号进一步放大, Q_5 形成共集电极电路使输入输出信号同相, C_4 和 R_9 形成 RC 滤波器滤除直流成分.

前置级放大电路输入输出信号波形如图 5 所示,输入信号是幅度为 10 mV ,频率为 10 kHz 的正弦波,在示波器中为 A 通道波形. 输出信号为 B 通道波形,输出波形与输入波形同相, $A_u \approx 50$. 因此,改进后的放大电路比传统的放大电路性能更稳定,容易得到较大的放大倍数.

在 Multisim 搭建如图 4 所示的电路进行噪声仿真,仿真结果如图 6 所示,由于图 6 所示的最大噪声为 $10^{-18}\text{ V}^2/\text{Hz}$,换算成噪声标准单位为 $10^{-9}\text{ V}/\sqrt{\text{Hz}}$,证明前置放大电路具有很强的抑制噪声能力.

3 锁相放大电路

在对 T 型 I/V 转换电路和前置放大电路进行改进的基础上,还需要设计锁相放大电路以实现去噪的目的.

锁相放大过程为:用调制器将待测微弱直流或缓慢变化信号变换成高频交流信号,对其放大后再解调恢复出原始信号. 该过程滤除了原信号中的低频噪声($1/f$ 噪声),同时避免了直流感应器的直流漂移偏差. 锁相放大器的基本结构如图 7 所示,由信号通道、参考通道、相敏检测器(PSD)和低通滤波器(LPF)等构成^[7].

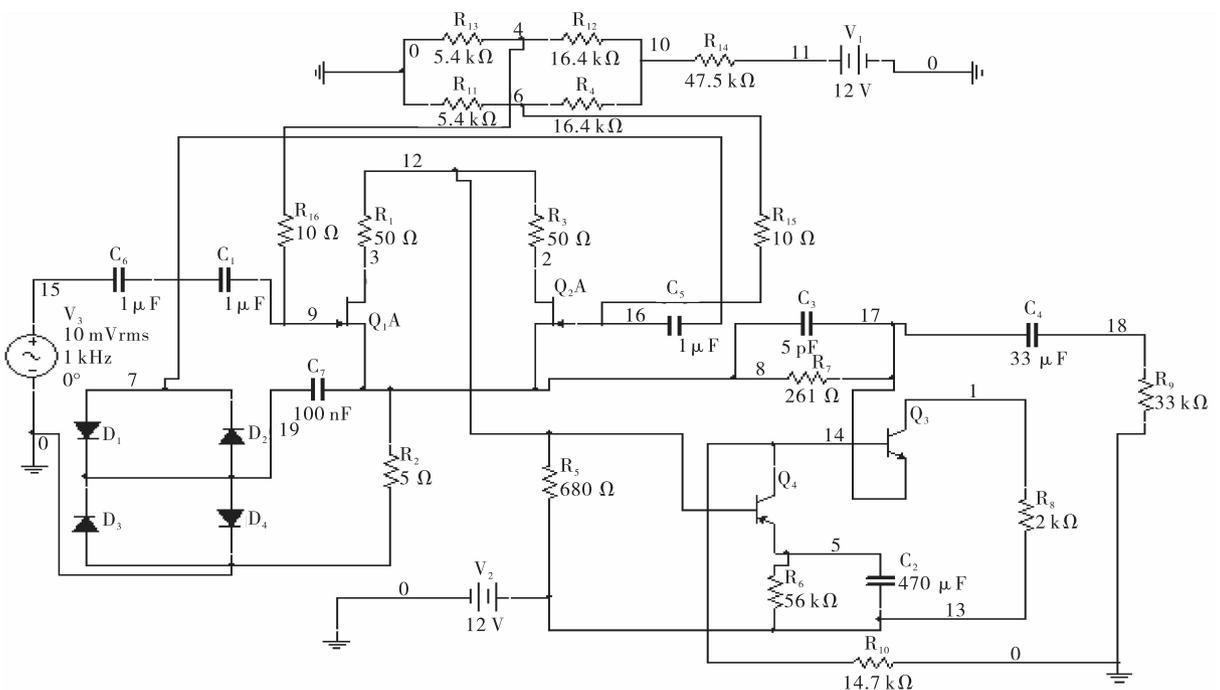


图 4 前置级放大电路图

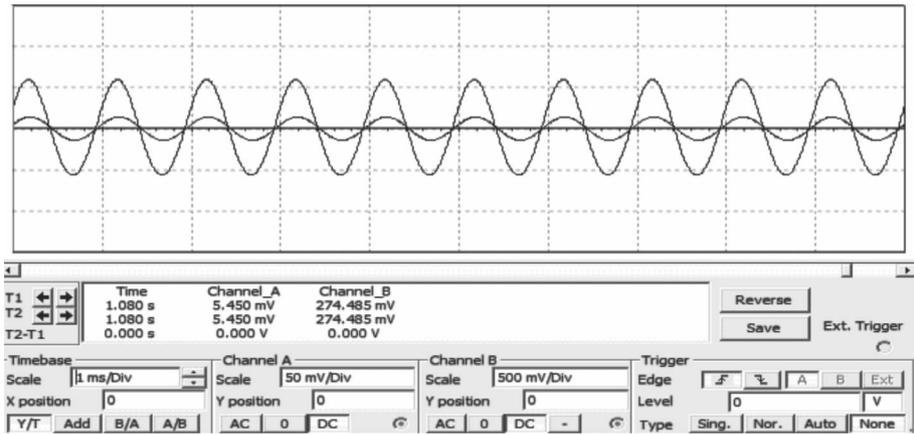


图5 输入输出信号波形图

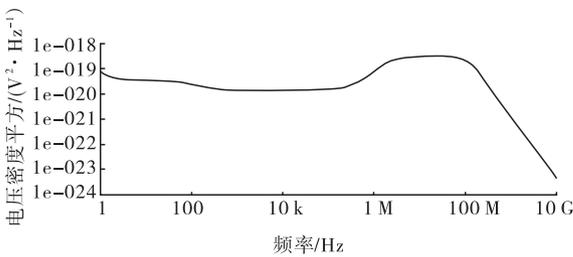


图6 噪声仿真波形图

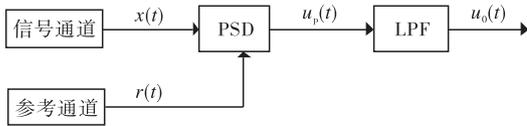


图7 锁相放大器的基本结构图

本电路的输入信号为 10 kHz 正弦信号与前端低频信号调制后的信号,参考信号为 10 kHz 的正弦信号.在信号通道内对调制信号进行交流放大以满足相敏检测工作电压的要求,再由带通滤波器滤除其他频率信号干扰,相敏解调后的信号通过低通滤波器恢复出待测低频信号,从而实现频带搬移,消除低频噪声.以相敏解调芯片 AD630 为核心搭建的相敏检测电路如图 8 所示.

参考信号 $x(t)$ 为 $V_s \cos(\omega_0 t + \theta)$, 噪声信号为 $V_n \cos(\omega_n t + \alpha)$, 参考信号 $r(t)$ 为 $V_r \cos \omega_0 t$ 经过解调后的信号为

$$u_p(t) = x(t)r(t) = 0.5V_s V_r \cos(\omega_0 t + \theta) + 0.5V_s V_r \cos(2\omega_0 t + \theta) + 0.5V_n V_r \cos[(\omega_0 + \omega_n)t + \alpha] + 0.5V_n V_r \cos[(\omega_n - \omega_0)t + \alpha] \quad (4)$$

式④右边的第 1 项为调制信号与参考信号的差频项,第 2 项为调制信号与参考信号的和频项,第 3 项为噪声与参考信号的和频项,第 4 项为噪声与参考信号的差频项.经过低通滤波器后,输出为第 1 项和第 4 项中 $|\omega_n - \omega_0| < B_L$ (B_L 为 LPF 的等效噪声带宽) 的噪声,只要 LPF 的等效噪声带宽足够窄,就可以得到满意的信噪比.

根据锁定放大器的原理,利用 Matlab 软件搭建的仿真电路如图 9 所示,仿真波形如图 10 所示.图 10a) 所示波形为缓慢变化的待测信号与正弦载波信号进行调制的信号,加上图 10c) 所示的高斯噪声信号得到如图 10d) 所示的输入信号,输入信号与图 10b) 所示的参考信号(与载波信号同频同相)进入相敏解调器,相乘解调后得到图 10e) 所示的相敏检波信号.相敏检波信号含有多种频率的信号,根据

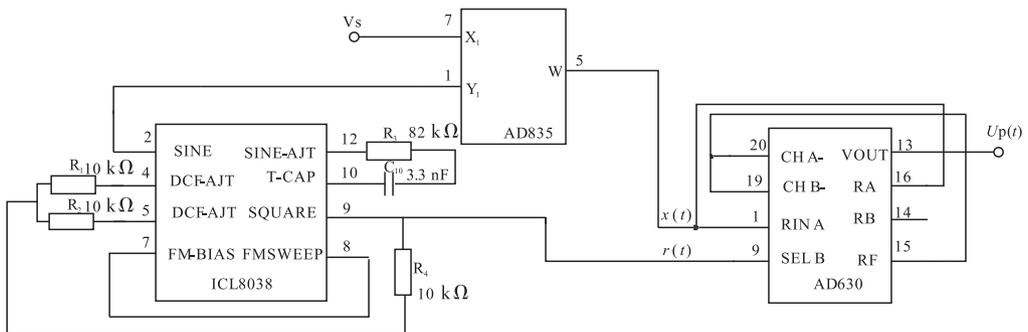


图8 相敏检测电路图

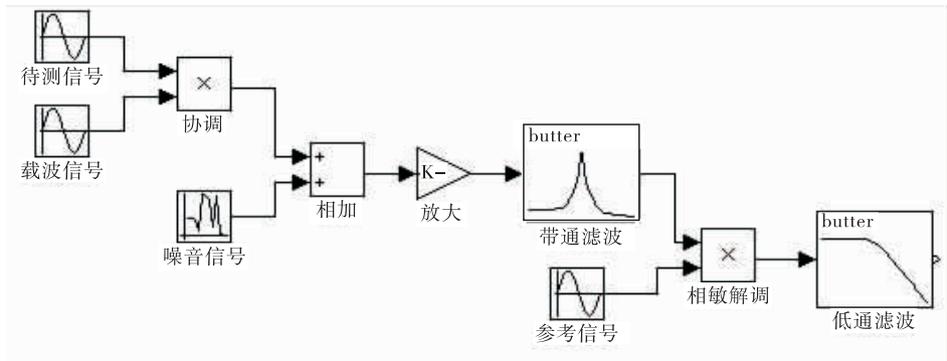


图9 锁定放大器仿真电路图

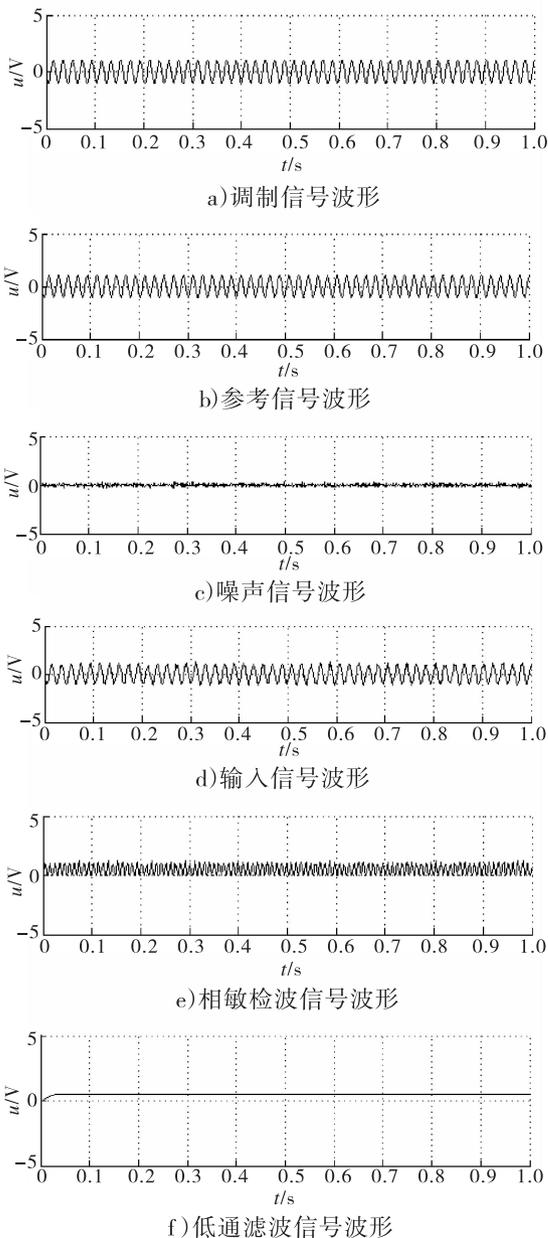


图10 仿真波形图

待测信号的频率设置相应的 LPF 截止频率, 经过 LPF 滤除其他频率的信号后, 剩下如图 10f) 所示的待测信号. 通过仿真分析可知, 锁相放大器保存了待测信号的信息, 高斯噪声信号全部被抑制, 较大地提高了微弱电流信号检测系统的信噪比.

4 结论

本文对传统 T 型 I/V 转换电路、前置放大电路进行改进的基础上, 基于调制-解调原理设计了锁相放大电路. 仿真结果表明, 该电路具有较高的共模抑制比和较强的噪声抑制能力, 能满足各种传感器微弱信号的测量要求, 解决了传统微弱电流信号检测技术存在的背景噪声、电路噪声、元器件噪声等的干扰往往大于信号本身, 从而影响测量结果准确性的问题. 此外, 该电路具有很强的扩展能力, 不仅可用于微弱电流信号测量, 还可以应用于光谱分析、RLC 阻抗分析等, 具有较高的实用价值.

参考文献:

- [1] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2011: 7-12.
- [2] 刘鹏民, 莫德举. T型反馈电阻网络在微弱信号放大电路中的应用[J]. 电测与仪表, 2009, 12(36): 31.
- [3] 李圣昆, 郑永秋, 安盼龙, 等. T型反馈网络在谐振式光纤陀螺频率锁定中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1161.
- [4] 张金利, 景占荣, 梁亮, 等. 微弱信号的调理电路设计和噪声分析[J]. 电子测量技术, 2007, 30(11): 40.
- [5] [美] W·O·亨利. 电子系统噪声抑制技术[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1978: 209-239.
- [6] 侯跃新, 周东亮, 肖丹, 等. 传感器弱信号的放大应用电路[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27(11): 65.
- [7] 姜利英, 胡杰, 陈青华, 等. 基于核酸适体传感器的便携式循环伏安测试系统[J]. 郑州轻工业学院学报: 自然科学版, 2014, 29(2): 38.