

基于电子开关式锁相放大器的微弱信号检测方法*

罗海军, 张晓华, 杨 鹏

(重庆师范大学 物理与电子工程学院, 重庆 401331)

摘要:在磁感应成像系统中,有用的二次磁场十分微弱,都淹没在主磁场中,因此采用微弱信号检测技术中的锁相放大器来提取。本研究以电子开关为相敏检波核心,利用相敏检波、锁相环、直流放大滤波、AD采样等电路模块,构成了精度高的模拟锁相放大器。该系统检测有效值 $10\sim 1\,000\ \mu\text{V}$ 频率为 $1\ \text{kHz}$ 的正弦信号,其误差在 2.6% 以内;输入相同幅值频率为 $1.05\ \text{kHz}$ 的噪声信号,其误差最大在 3% 以内;输入10倍幅值 $1.05\ \text{kHz}$ 的噪声信号,对测量结果有一定影响,其误差最大 8.6% 。所以,基于电子开关式锁相放大器有很好的噪声抑制能力,能够在强噪声背景下提取出特定频率微弱信号。

关键词:微弱信号;锁相放大器;移相器;相敏检波

中图分类号: TN791

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2016)06-0174-06

随着现代科学技术的发展,在许多领域需要测量物理量的微弱变化。例如:微弱电压或电流、微弱磁场、微弱压力、微弱电感、微弱电容、微弱声音和微弱的光等^[1]。由于这些微小量的变化通过传感器转换成的电信号十分微弱,可能是毫伏、微伏、纳伏级别,甚至更小。在强噪声背景下微弱特征信号检测,一直是工程应用领域的难题^[2],诸如雷达探测、声纳搜索、地质监测和工业测量等领域有着大量的需求^[3-4]。

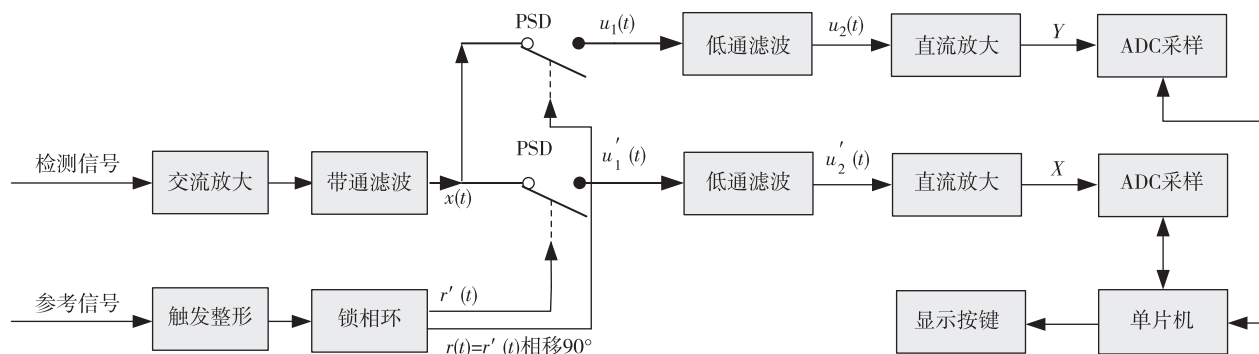


图1 电子开关式锁相放大器结构框图

Fig. 1 Structure diagram of lock-in amplifier with electronic switch

锁相放大器是一种利用互相关原理设计的同步相干检测仪器,具有很强的抑制噪声的能力,是微弱信号检测领域中常用的仪器^[5]。锁相放大器相当于一个Q值很高的带通滤波器,其等效带宽低至 $0.000\ 4\ \text{Hz}$,有效抑制参考频率以外的噪声,极大地提高测量信号噪比^[6]。锁相放大器对微弱信号测量有至关重要的作用,在许多信号检测领域得到大量的应用^[7]。本文设计一种基于电子开关式锁相放大器,利用模拟开关芯片替代模拟乘法器,简化了电路复杂度,降低系统成本。

1 锁相放大器基本原理

相敏检波(Phase sensitive detector, PSD)是锁相放大器系统中的至关重要的部件,而这一功能常常由模拟

* 收稿日期:2015-07-26 修回日期:2016-05-06 网络出版时间:2016-11-02 13:34

资助项目:国家自然科学基金(No. 51507023);重庆市教委科学技术研究一般项目(No. KJ130616)

作者简介:罗海军,副教授,博士,研究方向为电磁测量和电磁计算, E-mail: lhj19830330@126.com;通信作者:张晓华,实验师, E-mail: dzjs313@126.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20161102.1334.044.html>

乘法器来实现,但是模拟乘法器价格昂贵,且高速模拟乘法器不易购买。在本文中参考信号通过比较器变成方波信号,通过方波信号控制模拟开关构成电子开关式相敏检波器。电子开关式锁相放大器结构框图如图 1 所示,检测信号经过前置放大器放大和带通滤波模块,将直接送入 PSD 模块,参考信号利用比较器变为方波,经过锁相环移相为两路相差 90° 的方波,送入 PSD 模块去驱动模拟开关。电子开关输出的波形包含高频分量和直流分量,通过滤波器滤除高频分量,剩下的直流分量就包含了检测信号的幅值和相位变化信息。

对于电子开关式锁相放大器数学分析如下,假设测量信号为:

$$x(t) = V_x \cos(\omega t + \theta) \quad (1)$$

利用参考信号的方波控制模拟开关,方波高电平信号通过,低电平信号不通过,其作用等效于测量信号与同形状幅度为 1 的方波做乘法。两路参考信号如图 2 所示,其波形的周期为 T ,角频率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 。根据周期信号频域分析方法,这种周期矩形波利用傅里叶级数三角形式展开如下所示:

$$r(t) = \frac{2V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega t] + \frac{V_r}{2} \quad (2)$$

$$r'(t) = \left\{ \frac{2V_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega t] + \frac{V_r}{2} \right\} \quad (3)$$

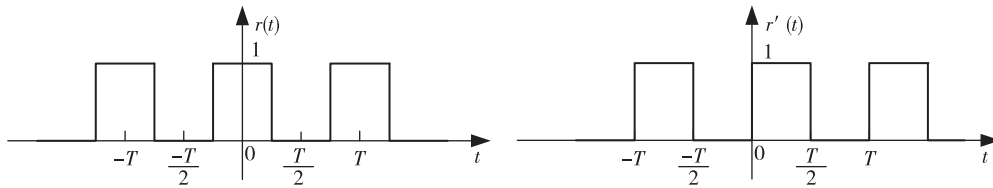


图 2 两路相位相差 90° 的参考信号波形示意图

Fig. 2 Two reference signals waveform with phase difference(90°)

将 $r_1(t)$ 和 $x(t)$ 相乘,结果可得:

$$u_1(t) = x(t) \cdot r(t) =$$

$$\frac{V_r V_x}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n\omega t + \theta)] + \frac{V_r V_x}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{2n-1} \cos[(2n-2)\omega t - \theta] + \frac{V_x V_r}{2} \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$$u_1'(t) = x(t) \cdot r'(t) =$$

$$\frac{V_r V_x}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n\omega t + \theta)] + \frac{V_r V_x}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2-2n)\omega t + \theta] + \frac{V_x V_r}{2} \cos(\omega t + \theta) \quad (5)$$

通过(4)和(5)式,可以看出,两式都由 3 部分组成,其中第 1 部分为参考信号和测量信号和频项,第 2 部分是两信号差频项,第 3 部分是测量信号和方波直流成分相乘项。根据以上两公式,当 $n=1$ 时,第 2 部分将产生直流,其他情况下都将产生交流,而直流部分里包含了测量信号的幅度和相位,如(6)和(7)式,其中 A 直流放大增益。通过低通滤波器被滤除,可以将直流分离出来。

$$Y = \frac{AV_r V_x}{\pi} \cos\theta \quad (6)$$

$$X = \frac{AV_r V_x}{\pi} \sin\theta \quad (7)$$

通过单片机系统采集 X, Y 的电压值,通过(8)式计算出被测信号的幅度和相位。

$$V_x = \frac{\pi}{AV_r} \sqrt{X^2 + Y^2}; \theta = \arctan \frac{X}{Y} \quad (8)$$

2 硬件系统

2.1 方波整形和锁相电路

在本系统中,相敏检波器(PSD)模块是系统的核心模块,其利用参考信号的方波驱动高速的模拟开关芯片(ADI 公司,AD8180)对测量模拟信号的导通和关断,模拟检测信号和参考方波信号的乘法运算。因此,在进行相敏检波器(PSD)模块前,需要将参考信号通过高速比较器(ADI 公司,AD8561)进行整形,将正弦信号转化为方波信号,而方波信号的时域抖动对整个信号的稳定性有至关重要的作用,在本文中选择了一款信号传播延时为 7 ns 的超高速比较器(AD8561),其电路图如图 3 所示。利用宽范围稳定的高速锁相环芯片(HC4046)和双 D 触

发芯片(74HC74)构成鉴相、压控振荡器、分频器、PLL 无源滤波网络。

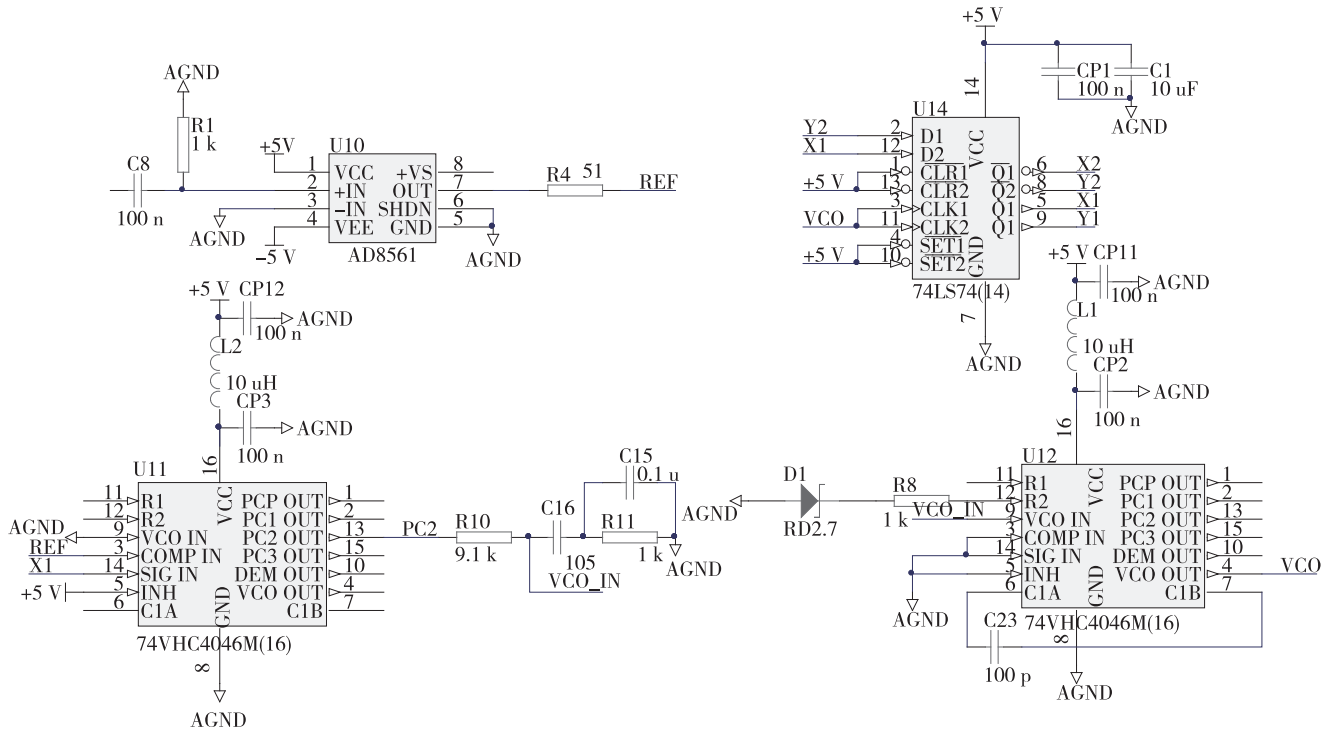


图 3 方波整形和锁相电路原理图

Fig. 3 Schematic of square wave shaping and phase locked circuit

PSD时需要有准确的 90° 移相信号。如图3所示,本文运用TI公司的双D触发芯片(74HC74)作为 $\frac{1}{4}$ 分频器,这种分频器经常用作逻辑电路发生 90° 相移时钟。本文中利用74HC74芯片将74HC4046压控震荡信号以参考信号4倍的频率进行倍频。

2.2 鉴相电路

模拟开关是本系统的核心器件,矩形方波和测量信号的乘法由该芯片完成,本文中选用ADI公司的单刀双掷模拟开关(AD8180),将两个输入管脚分别和测量信号与地相互连接。当方波位于高电平时,测量信号输出,模拟信号和“1”做乘法;当方波位于低电平时,输出信号接地,模拟信号和“0”做乘法。该模拟开关具有带宽750 MHz,回转率 $750\text{ V}/\mu\text{s}$,通道的切换速度10 ns等优点,这些指标对模拟开关相敏检波器至关重要的。在本系统中,使用2片模拟开关芯片,电路原理图如图4所示。

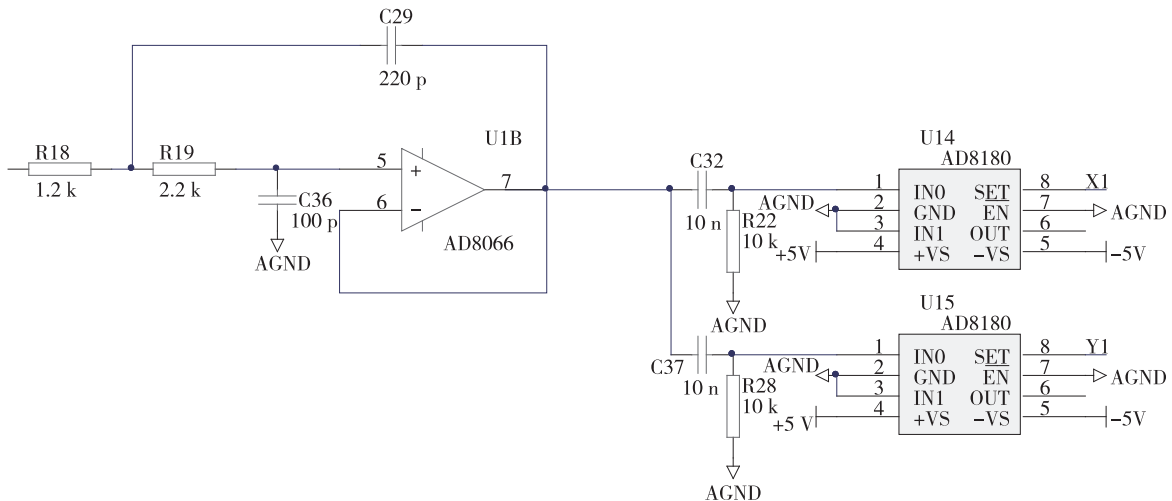


图 4 半波 PSD 电路原理图

Fig. 4 Schematic of half-wave PSD circuit

2.3 直流放大滤波和采集电路

通过相敏检波模块后,根据前面理论推导的公式(4)和(5),信号的直流部分中包含测量信号的幅度和相位信息,利用两直流信号就可以解析出信号的幅度和相位。通极低截止频率的低通滤波器除去信号中的交流成分,只保留直流分量,该滤波器直接影响后面信号的噪声大小。本文中利用两个一阶有源低通滤波电路构成窄带宽的滤波器模块,其中采用低温漂的金属薄膜电阻和等效电阻小的材质 X5R 电容。本模块输出的直流信号直接影响最终系统的测量精度,所以该模块中对直流的影响指标是选择运算放大器重要因素。在本文中采用 4 片精密运算放大器(OP07),如图 5 所示,该运放的偏置电流为 1.8 nA,温度漂移低至 $500 \text{ nV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

低通滤波器的优化设计可以有效地改善信噪比,其时间常数越大,滤波器截止频率越低,抑制噪声的能力越好,但是电路的稳态响应过程也越长。在本电路中时间常数设计为 300 ms。在该时间常数下,输出信号会在 1~2 s 内稳定,等效噪声带宽低至 0.42 Hz。经过相敏检波器(PSD)将参考和测量信号相乘,利用低通滤波器保留直流分量,通直流放大模块调整直流信号幅度^[8]。利用 AD8476 将单端信号转为差分信号,使 ADC 芯片利用差分信号采集负电压。ADC 采样芯片使用 ADI 公司的 AD7799,AD7799 是一款 3 差分通道、24-bit、单电源供电,其电路如图 5 所示。

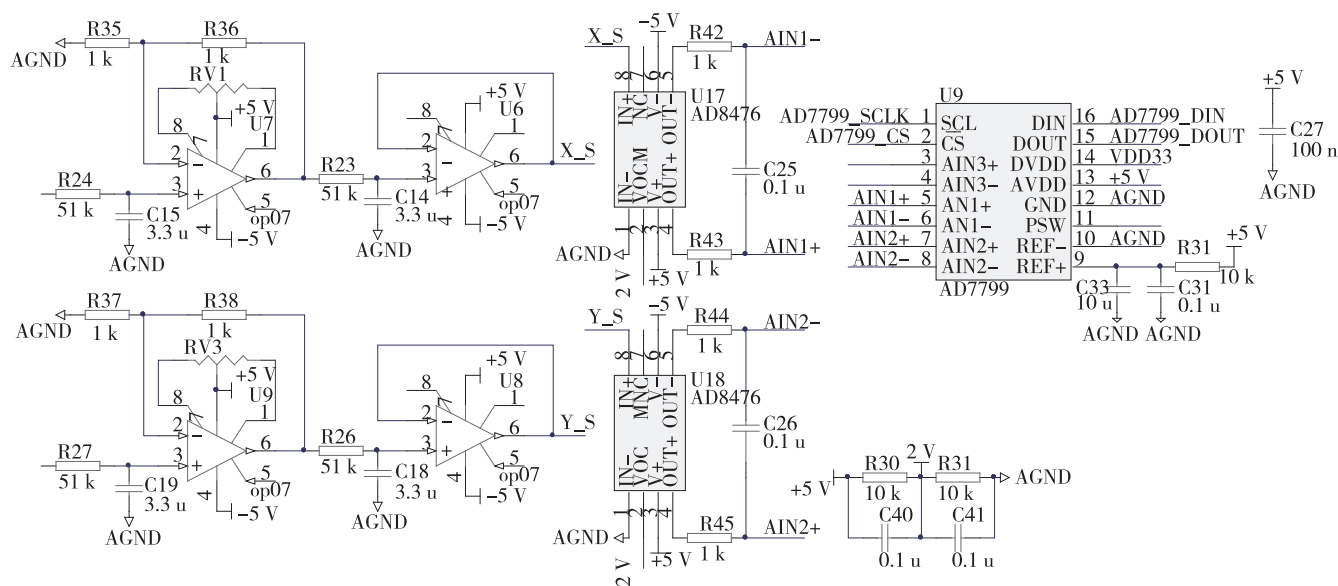


图 5 直流放大滤波和采集电路的原理图

Fig. 5 Schematics of DC amplification filtering and acquisition circuit

3 实验结果和分析

设计有效值 $10 \sim 1\,000 \mu\text{V}$ 的小信号,通过两个电阻分别为 $20\,000, 10 \Omega$ 的电阻器构成分压比 2 000 的分压网络,当输入有效值 $20 \sim 2\,000 \text{ mV}$,可以产生所要求的小信号,利用放大器(OP2177)构成电压跟随器隔离。

3.1 无噪声测量数据

输入频率为 1 kHz 的检测信号,改变信号的幅值,通过电阻分压将信号控制到 $10 \sim 1\,000 \mu\text{V}$ 的范围内,测量数据如表 1 所示,其测量误差小于 3%。

表 1 无噪声测量数据

Tab. 1 No noise measurement data

输入信号幅值/mV	20	60	100	200	600	1 000	1 200	1 600	2 000
分压衰减信号/ μV	10	30	50	100	300	500	600	800	1 000
测量信号幅值/ μV	9.9	30.5	51.3	102.6	307.7	510.7	611.8	809.2	1 001.9
误差/%	-1.0	1.7	2.6	2.6	2.6	2.1	2.0	1.2	0.2

3.2 信号与噪声 1:1 测量数据

输入频率为 1 kHz 的检测信号,同时叠加幅值 1:1 的频率接近的干扰信号(1.05 kHz),改变信号的幅值,通过电阻分压将信号控制到 10~1 000 μV 的范围内,其测量数据如表 2 所示,其测量误差也小于 3%,所以对测量结果没有明显的影响。

表 2 信号与噪声 1:1 测量数据
Tab. 2 Signal-to-noise 1:1 measurement data

输入信号幅值/mV	20	60	100	200	600	1 000	1 200	1 600	2 000
分压衰减信号/ μV	10	30	50	100	300	500	600	800	1 000
测量信号幅值/ μV	9.9	30.5	51.2	102.6	307.4	510.0	609.9	806.8	996.6
误差/%	-1.0	1.7	2.4	2.6	2.5	2.0	1.7	0.8	-0.3

3.3 信号与噪声 1:10 测量数据

输入频率为 1 kHz 的检测信号,同时叠加幅值 1:10 的频率接近的干扰信号(1.05 kHz),改变信号的幅值,通过电阻分压将信号控制到 10~1 000 μV 的范围内,其测量数据如表 3 所示,其测量误差也小于 8.6%。

表 3 信号与噪声 1:10 测量数据
Tab. 3 Signal-to-noise 1:10 measurement data

输入信号幅值/mV	20	60	100	200	600	1 000	1 200	1 600	2 000
分压衰减信号/ μV	10	30	50	100	300	500	600	800	1 000
测量信号幅值/ μV	9.5	30.3	50.4	100.4	293.3	478.1	569.6	745.2	914.4
误差/%	-5.0	1.0	0.8	0.4	-2.2	-4.4	-5.1	-6.9	-8.6

3.4 测试结果及分析

该系统能够检测能够精确频率为 1 kHz,有效值 10~1 000 μV 的范围内的信号,其误差小于 3%;有用信号和频率接近的噪声信号(1.05 kHz)为 1:1,其误差也小于 3%;有用信号和噪声信号为 1:10,对测量结果有一定影响,其误差最大 8.6%。因此基于电子开关时的模拟锁相放大器很强频率选择能力和噪声抑制功能。

4 结语

锁相放大器可在强噪声环境下提取出与参考信号同步的微弱待检信号得到相应的直流信号。本文以电子模拟开关为相敏检波核心,利用移相器、锁相环、直流放大滤波等电路模块,构成了精度高的模拟锁相放大器。电子模拟开关的锁相放大器替代了传统的锁相放大器的模拟乘法电路,减少相敏检测器环节的直流漂移,增加电路的动态范围。由于锁相芯片 74HC4046 的限制,该电路工作频率可以到 1 MHz;选择更加快速的锁相芯片可以提高电路的工作频率,可以工作在 10 MHz 范围内。

参考文献:

- [1] 夏均忠,刘远宏,冷永刚,等.微弱信号检测方法的现状分析[J].噪声与振动控制,2011,6(3):156-161.
Xia J Z,Liu Y H,Leng Y G,et al. Analysis of methods of weak signal detection[J]. Noise and Vibration Control System,2011,6(3):156-161.
- [2] 杨行,杨嵩,刘艺.微弱信号锁相检测的电路研究[J].压电与声光,2015,37(3):529-531.
Yang H,Yang S,Liu Y. Research on weak signal detecting circuit with lock-in amplifier[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics,2015,37(3):529-531.
- [3] Yang Y. Periodical weak signal detection based on LabVIEW[C]//2008 international conference on neural networks and signal processing. Nanjing:IEEE,2008:285-288.
- [4] 曾一凡,吴丹.微弱信号检测技术在超导电阻测量方面的应用[J].低温物理学报,2009,31(3):261-264.
Zeng Y F,Wu D. The applications of weak signal detection technology in the superconductor resistance measurement [J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics,2009,31(3):261-264.
- [5] Xu B Q,Zhou H H,Sun L L,et al. Weak-signal detection and the application in detection of electric motor faults [C]//2007 international conference electrical machines and

- systems. Seoul, South Korea: IEEE, 2007: 1103-1106.
- [6] 孙志斌, 陈佳圭. 锁相放大器的新进展[J]. 物理, 2006, 35(10): 879-884.
Sun Z B, Chen J G. Advance of lock-in amplifier[J]. Physics, 2006, 35(10): 879-884.
- [7] 李焯, 董秀珍, 刘锐岗. 磁感应断层成像中的一种高精度同步相位测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4): 796-801.
Li Y, Dong X Z, Liu R G. Precise synchronous phase measurement method in magnetic induction tomography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4): 796-801.
- [8] 罗海军, 何为, 徐征, 等. 基于同步检波的单通道磁感应成像技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(4): 899-904.
Luo H J, He W, Xu Z, et al. Study on the technique of single-channel magnetic induction tomography based on synchronous detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(4): 899-904.

A Weak Signal Detection Method Based on Electronic Switching Mode Lock-in Amplifier

LUO Haijun, ZHANG Xiaohua, YANG Peng

(College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In magnetic induction tomography system, the eddy magnetic field is very weak in the main magnetic field, so the phase lock amplifier is used. This paper to electronic switch for phase sensitive detection core, uses the phase shifter, phase locked loop, a direct current amplifier filter circuit module, constitute the high precision analog lock-in amplifier. The system detection effective value, frequency is 1 kHz signal, the error is less than 2.6%; enter the same amplitude and frequency 1.05 kHz noise signal, the error is not greater than 3%; inputting noise signals to 10 times the amplitude 1.05 kHz. On the measurement results have certain influence, the maximum error of 8.6%. Therefore, the electronic switching phase lock amplifier has good noise suppression ability and can extract the weak signal from the strong noise background.

Key words: weak signal; lock-in amplifier; phase shifter; phase sensitive detection

(责任编辑 游中胜)