

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.05.04

一种带移相功能的锁相放大电路设计及仿真

李丹, 张学聪, 蔡静

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了一种带移相功能的锁相放大电路的设计及仿真。锁相放大技术与窄带滤波相似, 包括相敏检波和低通滤波。本文带移相功能的锁相放大电路基于相敏检波芯片 AD630, 并设计 $0^\circ \sim 360^\circ$ 移相电路, 可调节相位, 以保证输入信号与参考信号相位一致, 得到输出最大值, 经过仿真试验验证, 该锁相放大电路可从 1000 倍的噪声中提取有效信号。

关键词: 锁相放大; 移相; AD630 芯片

中图分类号: TB971

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)05-0022-03

Design and Simulation of a Lock-in Amplifier with Phase-shift Function

LI Dan, ZHANG Xuecong, CAI Jing

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper presents the design and simulation of a lock-in amplifier (LIA) with phase-shift function, which can be used in processing small signals buried in noises. A lock-in amplifier is equivalent to a narrow-band filter. It basically $0^\circ \sim 360^\circ$ consists of a phase sensitive detector and a low-pass filter. The circuit is based on the phase-sensitive detector AD630, and is designed together with a phase-shift circuit, which can make the phase of reference signals coordinate with the phase of input signals. Simulation experiments verified that the LIA can extract useful signal from a noise signal of approximately 1000 times in amplitude.

Key words: lock-in amplifier (LIA); phase-shift; AD630

0 引言

锁相放大技术是从噪声中提取微弱信号的重要技术之一, 已经在近红外光谱信号提取、TDLAS 传感器测试气体浓度或温度、微弱生理信号检测、蓄电池内阻检测、信号继电器触点接触电阻检测、光纤气体传感检测系统等多个领域有所应用^[1-10]。其基本原理是利用输入信号和噪声信号之间的互不相关性进行相敏检波处理, 可以实现从信噪比较低的被测信号中提取完整的有用信号, 大幅抑制背景干扰噪声、提高检测灵敏度以及信噪比, 具有较高的稳定性和灵活性^[11]。商用的锁相放大技术已发展成熟, 但由于体积较大且功能繁杂, 不能嵌入到电路的功能扩展设计中。目前, 锁相放大电路模块又大多不具有移相功能。因此需要设计一种简单易实现的带移相功能的锁相放大电路来满足实际应用。

1 锁相放大电路总体设计

锁相放大电路基于互相关原理进行相敏检波处理, 噪声信号与参考信号相乘后得到的倍频及二倍频信号可通过设计低通滤波电路滤除, 因此可以从噪声背景中提取有用信号。具体锁相原理计算如下:

将输入信号与参考信号相乘, 得到两者和频、差频及输入信号与噪声信号的乘积分量^[2], 假设输入信号为正弦波信号 $M \sin(\omega t + \alpha)$, 噪声信号为 $n(t)$, 参考信号为正弦波信号 $N \sin(\omega t + \beta)$, 则相敏检波输出 $V = (M \sin(\omega t + \alpha) + n(t) * N \sin(\omega t + \beta))$ 。

由积化和差公式得到相敏检波器的输出为

$$V = \frac{1}{2}MN \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2}MN \cos(2\omega t + \alpha + \beta) + n(t)N \sin(\omega t + \beta) \quad (1)$$

设计低通滤波器滤除二倍频信号 $\frac{1}{2}MN \cos(2\omega t + \alpha + \beta)$ 以及噪声与参考信号的乘积项 $n(t)N \sin(\omega t + \beta)$, 得到直流信号 $\frac{1}{2}MN \cos(\alpha - \beta)$ 为最终结果。

在相敏检波电路中, 输入信号与参考信号进行乘法运算, 相位差决定了输出幅值的大小及正负。如图 1 所示, 两信号同相(相位差为 0°)时, 相敏检波结果为正向正弦半波, 经过低通滤波后输出信号正向最大; 两信号相位差 90° 时, 低通滤波后输出信号为 0, 信号反相(相位差为 180°)时, 低通滤波后输出信号反向最大。因此为保证参考信号与输入信号锁相输出直流信号最大, 应设计移相电路。

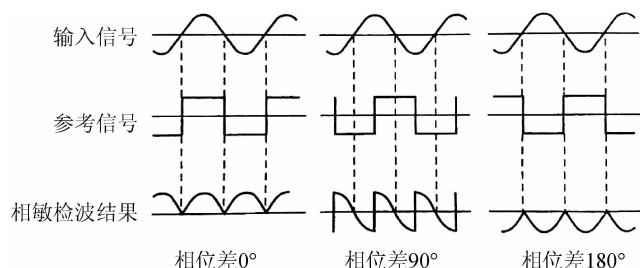


图1 相敏检波电路信号相位差不同的转换波形

锁相放大器电路设计如图2所示,相敏检波芯片应用高性能芯片AD630,电路主要包括输入信号通道、参考信号通道、移相、相敏检波和低通滤波几个部分。

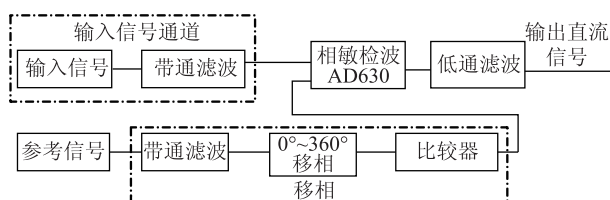


图2 锁相放大电路组成及信号流向图

2 电路实现及仿真

相敏检波电路作为锁相技术中的乘法器,其性能决定了微弱信号的检测水平,选用高性能芯片AD630搭建,其内部由运算放大器A、运算放大器B和比较器组成,由参考信号的幅值决定运算放大器A或B工作,通道A和B隔离度超过100 dB。输入信号和参考信号进入相敏检波电路处理后,通过基于OP07芯片设计的有源RC低通滤波后可得到直流有用信号,如图3所示。

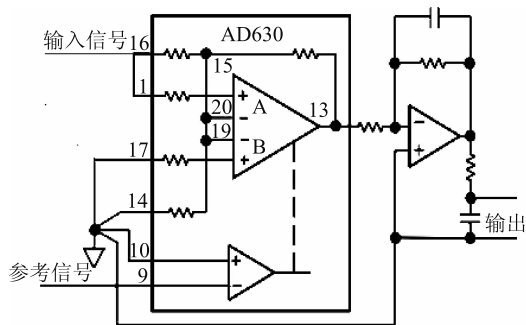


图3 AD630相敏检波及低通滤波电路示意图

由于目标输入信号成分繁杂、频率多样,在输入信号进入锁相芯片前设计带宽较窄的带通滤波电路,可去除高频或低频噪声输入,避免不同频率噪声干扰锁相滤波功能,因此在输入信号后端加入带通滤波。

带通滤波设计如下:选择一个避开工频50 Hz的频率,应用前置放大芯片OP07设计中心频率为80 Hz,带宽20 Hz的二阶有源带通滤波器。品质因数为 $Q = \frac{f_0}{B} =$

$\frac{80}{20} = 4$,角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$, Au_0 为中心频率处的增益, $Au_0 = -1$, $C1 = C2 = 0.01 \mu F$, 得到:

$$R_3 = \frac{Q}{\pi c f_0} = 1.59 \text{ M}\Omega$$

$$R_1 = -\frac{R_3}{2Au_0} = 0.796 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = -\frac{Q}{CW_0(2Q^2 + Au_0)} = 25.68 \text{ K}\Omega$$

结合电阻阻值的实际情况,分别选用1.5 M Ω , 0.75 M Ω 和25 K Ω 阻值的电阻。根据锁相放大电路的原理可知,当参考信号与输入信号同相或反相时,低通滤波器输出的电压幅值最大,而当相位差为90°或270°时,输出的电压幅值为0,因此需要设计移相电路,调整参考信号的相位,使其与输入信号同相或反相,保证电压输出幅值最大。

移相电路包括带通滤波、0°~360°移相、比较器三个部分,考虑到如果参考信号为方波,直接进行移相,输出的波形有失真的现象,因此先经过带通滤波将方波变为正弦波,之后经过0°~360°移相进入比较器输出方波作为参考信号。

利用电容端电压落后于电流90°的原理,OP07与RC电路构成0°~180°移相电路。采用两个180°移相电路级联的方式实现0°~360°移相。其中带通滤波与图4设计一致,移相及比较器部分如图5所示。

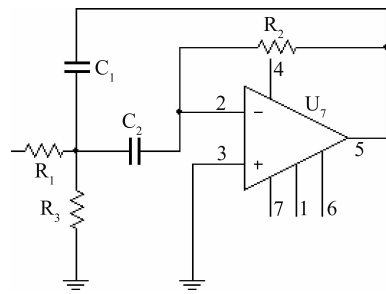


图4 带通滤波电路图

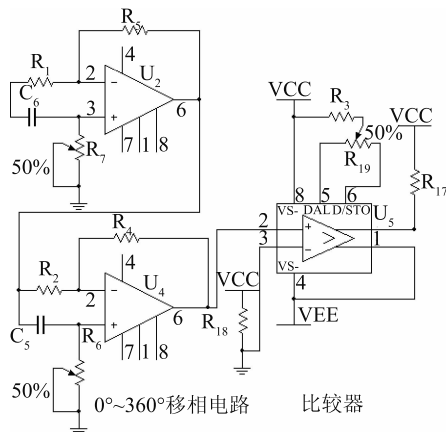


图5 移相电路图

应用仿真软件对锁相电路设计进行仿真,并通过信号源提供输入信号及参考信号,用示波器测试锁相滤波后信号。通过调节 $0^\circ \sim 360^\circ$ 移相电路中的滑动变阻器,可以调整参考信号的相位,将参考信号的相位调整到与输入信号相位相同,保证输出信号幅值最大,如图 6 所示。

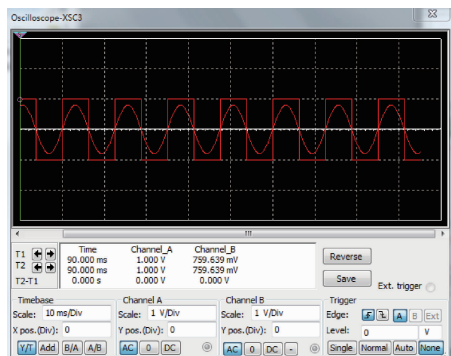


图 6 参考信号与输入信号相位一致图

为便于测试该锁相放大电路从噪声中提取有用信号的能力,采用加法器的方式给输入信号叠加白噪声,噪声幅值设置为 10 mV,如图 7 所示。参考信号为方波 0.5Vp-p (± 1 V)。通过设置不同的输入信号值 0.01, 0.02, 0.1, 0.2, 0.4, 1 mV, 得到叠加噪声前后的锁相放大后低通滤波值,输入信号与锁相放大输入值呈线性关系,如图 8 所示。

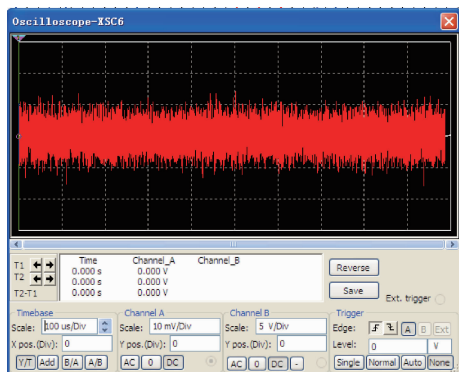


图 7 噪声信号(热噪声 1000 倍)

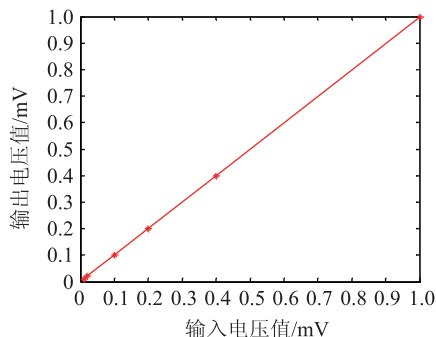


图 8 输入电压值与锁相放大低通滤波输出曲线

从图 8 结果可以看出,输入信号为 0.01 mV 时,叠加 10 mV 白噪声的锁相输出可精确的逼近输入信号值,因此该设计至少可以实现比噪声小 1000 倍的信号的检测。

3 结论

基于 AD630 相敏检波芯片设计了一种带移相功能的锁相放大电路,通过仿真试验验证,该锁相放大电路至少可以从比信号大 1000 倍的噪声中提取有用信号,并且移相功能简单有效且操作方便。建议实际制作电路板时应充分考虑 PCB 板绘制时的布线、屏蔽以及板材等多方面因素,提升该锁相放大电路提取微弱信号的能力。

参考文献

- [1] 孔令伟,廖俊必,甘芳吉,等. 锁相技术在 FSM 管道腐蚀测量中的应用[J]. 电子测量技术, 2012(10).
- [2] 贾振安,王培培,乔学光,等. 基于锁相放大的近红外光谱信号提取电路研究[J]. 仪表技术与传感器, 2012(04): 104-106.
- [3] 朱晓莉,厉霞. 基于 AD630 的双相锁相放大器设计[J]. 机电工程技术, 2012, 41(06): 19-23.
- [4] 蒋鹏,赵国忠. TDS 用锁相放大器电路设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(04): 24-28.
- [5] 陈希. 基于 AD630 锁相放大器的研究设计及其在光纤气体传感检测系统中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [6] 夏勇. 锁相放大技术在蓄电池内阻检测中的应用[J]. 电子技术应用, 2004(03): 21-23.
- [7] 刘举平,余为清. 信号继电器触点接触电阻双锁相放大检测仪设计[J]. 低压电器, 2013(17): 31-33.
- [8] 黄增跃,姬军,王云龙,等. 呼吸感应体积描记系统中弱信号锁相放大模块的设计[J]. 传感技术学报, 2014, 27(01): 17-20.
- [9] 刘芳芳. 基于 AD630 的锁相放大器的设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [10] 孟浩玉,王彦,汪诚伟,等. 基于锁相放大原理的微弱光信号检测系统设计[J]. 光学与光电技术, 2014(06).
- [11] 董菲菲. 基于 TDLAS 技术的微弱信号处理电路设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.

收稿日期: 2020-09-20

作者简介

李丹(1990-),女,黑龙江通河人,工程师,硕士,主要研究方向为辐射测温及微弱信号放大电路。

