

一种用于相移干涉仪的高压放大电路

段源鸿¹ 韩 森^{1,2} 唐寿鸿^{1,2} 卢庆杰¹

(1. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093;

2. 苏州慧利仪器有限责任公司 苏州 215123)

摘 要: 基于自主研制高精度数字化相移干涉仪的需求, 针对干涉仪的压电陶瓷移相器设计了一种高压放大电路。通过双极性运算放大器 OP07 构成低噪声, 非斩波稳零的低压放大电路与中功率线性三极管 MJE340 和 MJE350 构成高压放大电路进行直流耦合, 结合反馈网络, 功率放大电路, 滤波电路以及限流保护电路, 将计算机输出的 0~5 V 低电压的移相控制信号稳定线性放大到 -30 V~+130 V 范围, 且输出低至 10 mV 峰值的纹波, 满足压电陶瓷移相器的高压驱动控制要求和相移干涉仪的高精度移相测量的要求。

关键词: 移相干涉仪; 压电陶瓷; 高压放大电路; 运放 OP07; 功率三极管

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

High voltage amplifier for phase-shifting interferometer

Duan Yuanhong¹ Han Sen^{1,2} Tang Shouhong^{1,2} Lu Qingjie¹

(1. University of Shanghai for Science and Technology, School of Optical-Electrical and Computer Engineering, Shanghai 200093, China;

2. Suzhou H&L Instruments LLC, Suzhou 215123, China)

Abstract: This paper designs a high-voltage amplifier suitable for driving piezoelectric actuator based on self-developed high-precision digital phase-shift interferometer. This amplifier adopted the way of DC coupling between low-noise, non-chopper-stabilized low-voltage amplifier circuit and high-voltage amplifier circuit, and combined with feedback network, power amplifier circuit, filter circuit and current limiting protection Circuit. The amplifier circuit is mainly consist of OP07 op-amp and the power transistors (MJE340&MJE350). The range of 0 V to 5 V low input voltage produced by the computer is stably amplified into the -30 V to +130 V. Output ripple peak is as low as 10 mV. Thus, the high-voltage amplifier has better stability satisfying the requirements of driving control of the piezoelectric ceramic phase shifter and the high accuracy requirement for the interferometer.

Keywords: phase-shifting interferometer; piezoelectric transducer; high-voltage amplifier; operational amplifier (OP07); power transistors

0 引 言

干涉仪是一种利用光干涉原理进行量测的仪器, 通过测量两束相干光间的光程差变化, 以及干涉条纹变化, 可测得几何长度或折射率的微小变化量, 从而获得与此相关的其他物理量。移相干涉仪的精密是通过移相得到多幅干涉图, 再由多幅干涉图求解相位分布^[1-2]。压电陶瓷移相法是目前较为通用方法^[3], 利用压电陶瓷的逆压电效应, 通过控制压电陶瓷上的电压来控制压电陶瓷的形变位移, 通常驱动电压范围在几十 V 到几百 V。数字化移相干涉仪中, 移相控制将由高压放大电路驱动压电陶瓷产生, 高压放大电路的输出稳定性及纹波大小是移相干涉仪的测量精度决定

因素之一。因此压电陶瓷的高压放大电路也成了数字化相移干涉仪的关键发展技术之一。

高压放大电路可采用高压运算放大器和分立元件构成的放大电路两种方案。高压运算放大器通常采用采用 PA 系列高压运放^[4-6], 其可直接输出近百伏的高压驱动压电陶瓷。高压运放电路原理简单, 使用方便, 但失调电压较大, 负载能力弱, 器件价格较昂贵的缺点。采用分立元件实现高压放大电路的设计方案^[7-10], 具有较低失调电压, 较强带负载能力, 也可根据不同的实际需要改变电路参数和结构, 但会加重输出的非线性 and 自激现象。

考虑到设计成本, 以及数字化移相干涉仪高精度测量的要求, 采用分立元件低压运放与高压功率管设计了一种

稳定线性且输出纹波较小的高压放大电路。

1 高压放大电路在相移干涉仪中应用

根据干涉原理,两束相干光发生干涉时,其干涉条纹的光强分布为:

$$I(x, y; \theta) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(\varphi(x, y) + \theta); \quad (1)$$

式中: $a(x, y)$, $b(x, y)$ 分别为干涉图背景光强和调制度; $\varphi(x, y)$ 为表征被测面形的参考与测试相干光束的相位差; θ 为相移干涉仪移相器引入的相位值。

相移干涉仪测量原理如图 1 所示。计算机通过 CCD 采集到干涉图样,输出控制信号,经过放大电路控制压电陶瓷(PZT)使参考面在小范围内平行移动,以改变参考光的光程,从而在物光和参考光之间引入相移 θ , 根据不同 θ 记录多幅干涉图样,可得到同一点的多个光强方程,相位 $\varphi(x, y)$ 将由这些方程求得。 θ 值的控制是通过压电促动器产生纵向或横向形变,改变参考面的位移变化。压电促动器有压电陶瓷堆栈构成,其形变大小是由其两端的电压决定,通过应用特定的电压,参考面做出精确的运动。

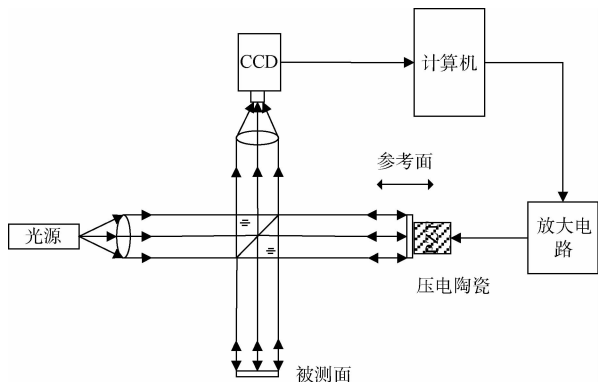


图 1 移相干涉仪测量原理示意图

压电促动器的驱动电压范围为几十 V 到几百 V, 计算机输出的控制信号受到其供电电源限制输出移相控制信号电压范围为 0 V~5 V, 高电压增益的放大电路将计算机输出控制信号放大到 0 V~120 V 的电压范围控制压电促动起产生相应的位移变化。干涉仪是高精度的测量仪器, 所测量的物理量是非常微小的, 干涉仪的每个环节都需要较好的稳定性和精确度, 放大电路输出信号需要较好的稳定性, 且输出纹波尽可能的小。

2 放大电路工作原理

本文针对相移干涉仪课题研究需要, 选择采用分立元件低压运放和功率三级管实现稳定线性的高压放大, 高压放大电路原理框图如图 2 所示。放大电路由 4 个部分组成: 输入级(低压差分放大)、中间级(高压线性放大)和输出级(功率放大、保护电路及滤波电路)、反馈网络。

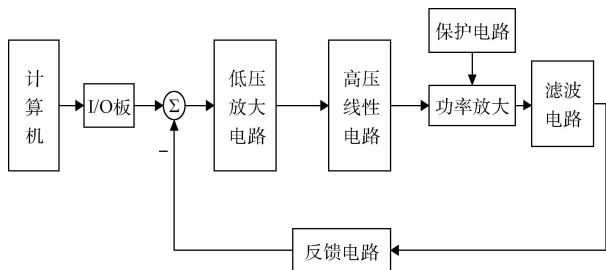


图 2 高压放大电路原理框图

2.1 低压放大电路及反馈电路设计

放大电路的低压放大电路和反馈网络如图 3 所示。低压放大电路和反馈电路是由 OP07 运放构成一个同相比例放大电路。运放 OP07 是一种低噪声, 非斩波稳零的双极性运算放大器, 具有非常低输入失调电压(约为 25 μ V)和低至的 2 nA 的输入失调电流, 较大的开环增益(开环增益约为 300 V/mV)以及低噪声等特点, 是减小高增益放大电路的输出纹波很好的选择, 非常适合干涉仪驱动放大电路需要。

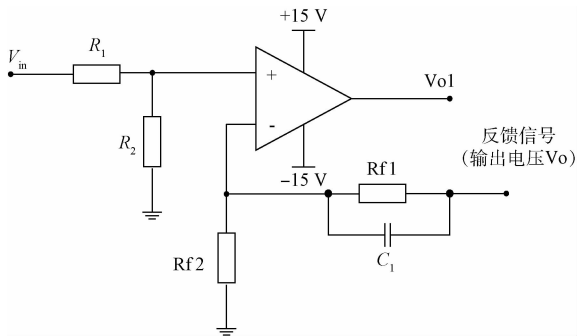


图 3 低压放大电路与反馈电路

高压放大电路的电压放大增益为 $\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f2}}$, $R_2 \gg R_1$, $\frac{R_1}{R_1 + R_2}$ 近似为 1, 电压增益则由 $\frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_{f2}}$ 决定。 R_1 和 R_2 的设计, 好处在于没有 V_m 输入时, 由于 OP07 运放的输入失调电流为 2 nA, R_2 阻值设计为 22 Ω , 此时输入电压为 44 nV, 若放大倍数是 50 倍, 此时输出为 2.2 mV, 可以近似输出为 0 V。干涉仪测量过程中难免会遇到输入悬空或断电上电过程, 有效的避免了输出未知状态。

同时需要注意的是 R_1 和 R_2 的加入会影响输入阻抗的大小, 两者阻值的选择也不可设计过小, 以免影响移相电压信号输入。并联在 R_{f1} 两端的电容, 对输出信号进行相位补偿以避免相位变化导致正反馈自激振荡, 防止移相器失控得到无效的干涉测量结果。

2.2 高压线性放大电路设计

高压线性放大部分如图 4 所示。高压线性放大部分

采用双极性电压放大结构,通过中功率线性三级管 MJE340 和 MJE350 构成的共发射极放大电路和射极跟随器,对运放输出的低压信号 V_{oi} 进行高电压增益放大。MJE340 和 MJE350 均是耐压值为 300 V 的中功率三极管,其中 MJE350 是 MJE340 的互补的 PNP 三极管,两者性能具有较好的对称性,对双极性放大电路设计有很多的好处。

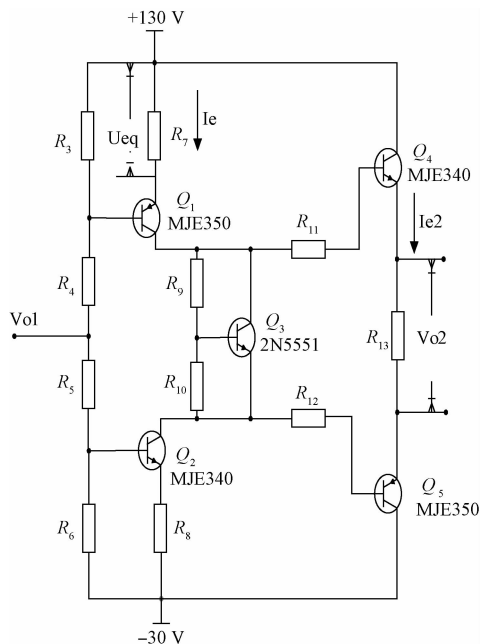


图 4 高压线性放大电路

由于移相干涉仪的移相控制信号对负压放大要求较低,但 0 电位点附近电压的放大时必不可少的。设计负压由 -30 V 的电源供电,正压由 130 V 电源供电,放大电路输出范围在 -30 V 到 130 V ,这样既保证了 0 电位点的放大,也满足 $0-30\text{ V}$ 的负压放大。

2.3 功率放大、限流保护电路及滤波电路设计

采用由大功率三极管 MJE340 和 MJE350 构成的常规互补推挽结构进行功率放大如图 5 所示。根据输出功率的大小设计多级推挽结构,采用两级推挽结构分散功耗和热量,以避免每对三极管所消耗功率过大,发热较多,影响放大稳定性。

限流保护电路通过三级管 Q_4/Q_5 , R_{16}/R_{17} , R_{14}/R_{15} 构成。当流过限流电阻 R_{16}/R_{17} 的电压超过三级管 Q_4/Q_5 导通电压, 限流三极管 Q_4/Q_5 将导通, 限制了功率管 Q_6 、 Q_7 、 Q_8 、 Q_9 基级电流输入, 从而限制输出级的输出电压和电流。

滤波电路由电感 L_1 、 L_2 和电容 C_2 构成的低通滤波电路,截至频率低至 5 kHz,对放大信号进行高频滤波,有限的减小纹波,输出纹波低至 10 mV 的峰值。电容 C_2 需选择耐高压的涤纶电容。

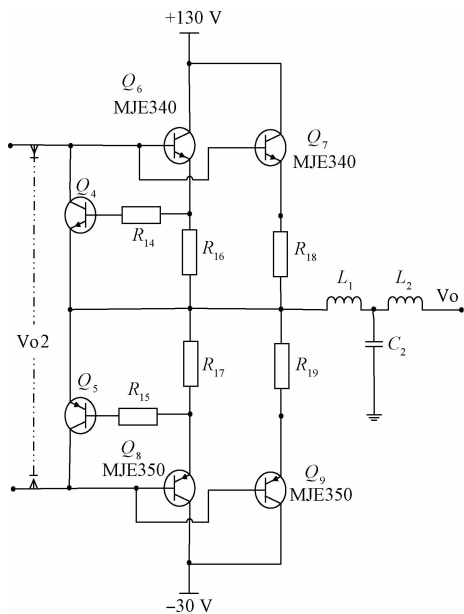


图 5 功率放大电路和限流保护电路

3 实验结果

在移相干涉仪测量过程中除了会变化的相位值,即式(1)中的 θ ,完成多幅干涉图样的测试,而且会稳定在某一相位值 θ 测试一幅静态的干涉图样。对应在压电陶瓷的驱动上,干涉图样的动态测量则需要交流信号控制,一般控制信号的频率小于100 Hz。静态测量时,压电陶瓷稳定在某一位置,则需要直流电压的驱动。因此对放大电路,进行两种直流电压放大测试和低频正弦信号放大测试。放大电路实物图如图6所示。

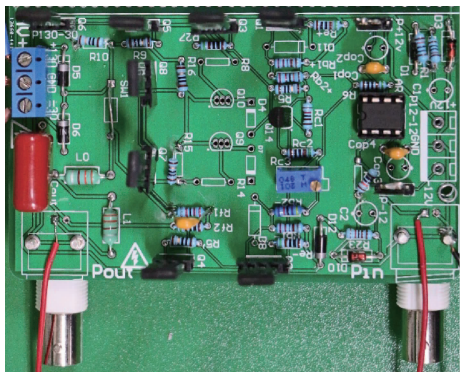


图 6 放大电路实物图

1) 直流电压放大测试

表 1 记录直流电压输入对应放大后输出电压,采集 10 组数据。电压放大倍数稳定在 43.5 倍左右,放大性能稳定,线性度好,输出纹波为 10 mV 峰值。该电路有效的克服了分立元件的非线性和不稳定性,能够准确将计算机输出的移相控制信号放大,稳定控制压电陶瓷的形变位移波

形图如图 7 所示。

表 1 放大电路直流输入与输出

| 输入电压/V | 输出电压/V | 放大倍数 |
|---------|--------|-----------|
| 0.298 | 13.01 | 43.657 72 |
| 0.541 7 | 23.68 | 43.714 23 |
| 0.783 9 | 34.36 | 43.832 12 |
| 0.952 4 | 41.68 | 43.763 12 |
| 1.063 2 | 46.47 | 43.707 67 |
| 1.513 7 | 65.81 | 43.476 25 |
| 2.032 8 | 87.99 | 43.285 12 |
| 2.533 | 109.52 | 43.237 27 |
| 2.754 | 118.84 | 43.151 78 |
| 2.986 | 128.68 | 43.094 44 |

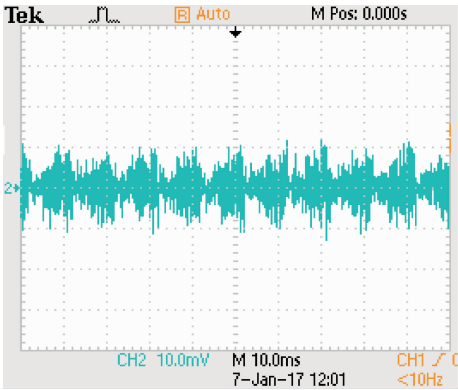
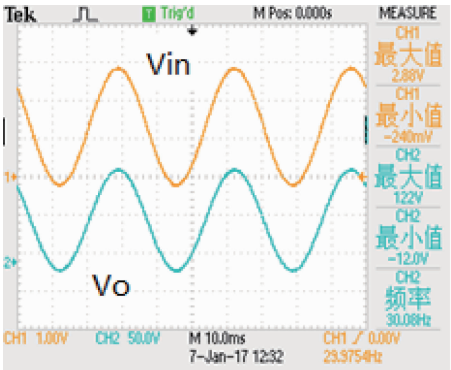


图 7 输出纹波波形图

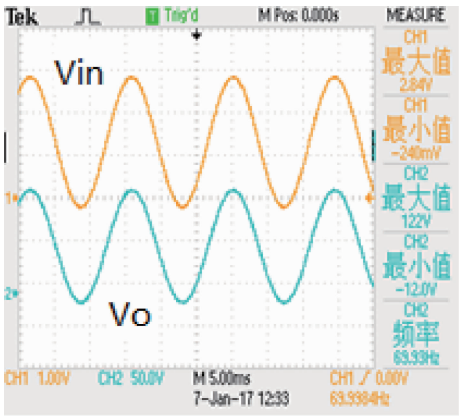
(2)低频正弦信号放大测试

测试 30、70、100 Hz 3 种频率的正弦输入信号。

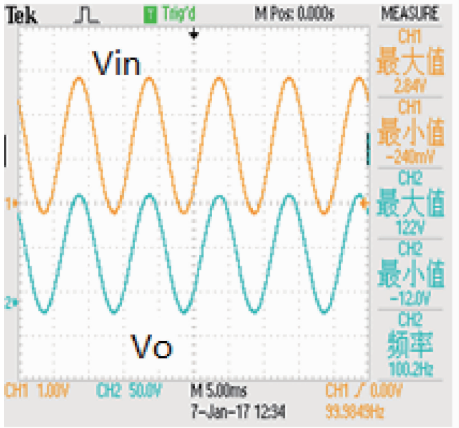
如图 8 所示,(a)(b)(c)分别是 30、70、100 Hz 正弦信号输入对应的输出。3 种峰峰值均为 3.12 V 的不同频率的正弦信号输入,均能完整峰峰值为 134 V 的正弦信号。从而可得出,该高压放大电路能够将连续的移相控制信号进行稳定放大。



(a) 30 Hz正弦信号输入



(b) 70 Hz正弦信号输入



(c) 100 Hz正弦信号输入

图 8 正弦信号放大波形图

4 结 论

针对相移干涉仪的移相控制系统,本文设计了一种压电陶瓷驱动的高压放大电路。驱动放大电路选择由低噪声运放 OP07 和大功率三极管 MJE340 和 MJE350 等分立元件构成的线性放大电路设计方案。结合干涉仪移相控制信号的特殊性,本文对高压放大电路进行了直流电压放大测试和低频正弦信号放大测试。根据测试结果,该放大电路输出范围为-30 V—+130 V,输出纹波<10 mV 峰值,对 100 Hz 以下的移相控制信号进行稳定放大,满足相移干涉仪的移相控制要求。

参考文献

[1] 朱沙,何天祥,方超,等. 激光干涉波形解调测量振动相位新方法[J]. 中国测试,2015(11):20-22,43.
[2] 代雷,吴迪,张健,等. 精磨光学元件面形的干涉检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(4):558-562.

(下转第 225 页)

性关系,其线性相关系数为 0.998 91(共 17 点)。该测试值符合式(2)所得结论。

4 结 论

本文基于散射光与透射光测量浊度的原理,设计了两级信号放大电路,将微弱电流信号转换为 A/D 可以处理的电压信号。具有自动零功能,受环境影响较小。实验证明,仪器对 0~400 NTU 范围内,浊度测量具有良好线性,通过散射光和透射光对浊度进行测量,具有高度一致性,均能达到较为理想的测试效果,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 尹亮,李哲,祁欣. 透射光补偿浊度测量方法的研究[J]. 北京化工大学学报:自然科学版,2013(3): 89-92.
- [2] 王志丹,常建华,朱成刚,等. 新型宽量程浊度传感器设计[J]. 传感器与微系统,2016(5):77-79,83.
- [3] 赵超,戴坤成,王贵评,等. 基于 AWLS-SVM 的污水处理过程软测量建模[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(8):1792-1800.
- [4] 王丽. 散射式水下浊度测量方法的研究[J]. 国外电子测量技术,2012,31(9):27-30.
- [5] 兰羽,张顺星. 一种直射式光电浊度计的设计[J]. 国外电子测量技术,2013,32(1):53-55.
- [6] 陶亮,曾以成,武世明. 一种具有新型过温保护功能的 LED 恒流驱动电路[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2015(4):659-664.
- [7] 陈卓,陈柏金. 基于 ARM 和 CPLD 的嵌入式卷板机数控系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(7): 45-49.
- [8] 何素梅,傅锦良,吴海彬. LED 隧道照明自动调光系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报,2015, 29(4):

622-629.

- [9] 惠德彬,赵志文. 时间相关光子计数探测器电路的设计与实现[J]. 电子测量技术,2016, 39(11): 135-139.
- [10] 贾波,祁欣. 便携式氯离子检测仪的设计[J]. 电子测量技术,2016,39(10):158-161,170.
- [11] 朵先林. 电位差计的等电位屏蔽及其应用[J]. 黑龙江科技信息,2012(8):60,228.
- [12] 陈卓,陈柏金. 基于 ARM 和 CPLD 的嵌入式卷板机数控系统设计[J]. 电子测量技术,2015, 38(7): 45-49.
- [13] 韩继国. 模/数转换器 ADC 技术分析(上)[J]. 集成电路应用,2014(5):18-22.
- [14] 杜帅,秦伟,张柯,朱雷. 基于 ZigBee 技术的绿地智能喷灌系统设计[J]. 国外电子测量技术,2016,35(3): 71-74,79.
- [15] 李德林,胡启亮,温晓东,等. 多量程浊度计检定及示值误差测量不确定度评定[J]. 工业计量,2016(5): 26-27,36.

作者简介

李哲,1988 年出生,博士研究生,主要研究方向为水质分析仪器的研制。

E-mail: originpoints@hotmail. com

邓雨,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为基于巴克豪森信号的应力检测仪研究。

E-mail: dengyusit@163. com

陈娟(通讯作者),工学博士,教授,主要研究方向为控制理论及先进控制方法、系统辨识与建模、智能检测技术与智能控制等方面。

E-mail: jchen@mail. buct. edu. cn

(上接第 220 页)

- [3] 袁刚,李世栋,王代华. 一种压电陶瓷叠堆执行器刚度测量方法研究[J]. 仪器仪表学报,2015, 36(3):568-573.
- [4] 王慧,宫赤坤,王宏峰. 基于 PA95 的新型压电陶瓷驱动电源[J]. 微计算机信息,2011(12):58-59.
- [5] 陈俊,徐志伟,陈杰. 压电驱动器驱动电源设计[J]. 国外电子测量技术,2014,33(4):48-53.
- [6] 王帅,吴庆林,张斌,等. 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(7): 6-10.
- [7] 周德海. 基于线性光耦实现精密程控高压源[J]. 电子测量技术,2013,36(6):29-34.
- [8] 郑楠,王学亮,李佩玥. 尺蠖式压电陶瓷驱动电源

设计[J]. 国外电子测量技术,2014, 33(8):49-52.

- [9] 赵轩毅,马力辉. 大功率压电陶瓷驱动电源的研究与设计[J]. 电子测试,2015(1):62-63,47.

- [10] 钟文斌,刘晓军,卢文龙,等. 一种误差放大式压电陶瓷驱动电源的研制[J]. 压电与声光,2014(2): 311-313.

作者简介

段源鸿,1993 年出生,上海理工大学光学工程在读硕士研究生,主要研究方向为光电精密测量、电子测量仪器、数字化干涉仪。

E-mail: duanyh722@hotmail. com