

线性位移检测信号调理电路设计

洪 琴,周 亮,贾中宁

(广州软件学院 计算机系,广东 广州 510990)

摘要:线性位移检测时会输出一个调幅波,幅值反映了位移大小,但位移方向无法判断。针对此问题,提出一种信号调理电路,主要由相敏检波器和低通滤波器组成。首先对其电路的工作原理做了理论分析、仿真设计与验证,然后设计制作 PCB 电路、对各个电路测试点的波形进行测试与验证。最后将其应用于 LVDT 线性位移测量,测得灵敏度 $S = -1.976\ 72\ \text{V/mm}$,非线性误差 $\gamma = 0.83\%$,实验结果表明,该相敏检波器具有结构简单、调试方便、抑制噪声能力强、可靠性高等优点,能够实现对信号的准确检测和解调。

关键词:LVDT;相敏检波;信号调理;低通滤波

中图分类号:TN702;TP212.13

文章编号:1000-0682(2024)03-0117-006

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.021

Design of signal conditioning circuit for linear displacement detection

HONG Qin, ZHOU Liang, JIA Zhongning

(Software Engineering Institute of Guangzhou, Guangdong Guangzhou 510990, China)

Abstract: When performing linear displacement detection using LVDT, an amplitude-modulated wave is output, with the amplitude reflecting the displacement size, but the direction of displacement cannot be determined. To address this issue, a signal conditioning circuit is proposed, mainly composed of a phase-sensitive detector and a low-pass filter. First, theoretical analysis, simulation design, and verification of the working principle of the circuit were conducted. Then, PCB circuits were designed and fabricated, and the waveforms at various test points of the circuits were tested and verified. Finally, it was applied to LVDT linear displacement measurement, with a measured sensitivity of $S = -1.976\ 72\ \text{V/mm}$ and a nonlinear error of $\gamma = 0.83\%$. Experimental results show that the phase-sensitive detector has the advantages of simple structure, convenient debugging, strong noise suppression capabilities, and high reliability, enabling accurate detection and demodulation of signals.

Keywords: LVDT; PSD; Signal conditioning circuit; LPF

0 引言

线性位移差分变压器 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) 是将被测位移量转换为变压器线圈的互感变化,它通过动杆和静杆切割磁感线的动作,将不可可视化的微弱位移等参数转换成可视化的电子信号,经过信号调理电路处理,形成直观的数字形式。LVDT 传感器因其具有较高的分辨力、

结构简单、工作可靠、准确度高、精度高、灵敏度高、使用寿命长、高稳定性和可靠性、环境适应性强等优点^[1],在大型航天伺服系统^[2]、大坝安全监测^[3]、侵彻引信^[4]、精密加工^[5]等领域中得到广泛使用。LVDT 测位移时,随衔铁的位移传感器会输出一个调幅波,因而交流电压表测量时存在无法判断衔铁移动方向的问题。必须引入特定信号调理电路来解决。

目前,已有学者提出加性相敏检波^[6]、差分放大电路和二极管来全波整流^[7]、精密整流型全波相敏检波电路^[8]、开关型相敏检波电路^[8]、振荡电路^[9]等,但存在电路复杂、调试困难等问题。为了简化电路和提高可靠性,提出一种信号调理电路,主

收稿日期:2024-02-14

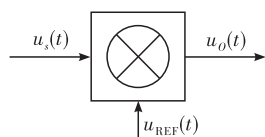
基金项目:广州软件学院 2023 年“质量工程”建设项目 (JYS202302)

第一作者:洪琴(1984—),女,汉,湖北黄冈人,硕士研究生,讲师,研究方向为传感器及其信号调理电路。

要由相敏检波器 (Phase - sensitive detector, PSD) 和低通滤波器 (low pass filter, LPF) 组成, 作为 LVDT 线性位移检测的新方案。

1 线性位移检测系统的构成与数学原理

线性位移检测需要对 LVDT 的输出信号进行调制, 使得输出信号能够反映输入信号的变化趋势。模拟相敏检波的基本思想是利用参考信号与被测信号进行信号调制, 从而达到移频、窄带滤波、信号检出等目的^[9]。它的基本工作思路可以理解为先整流再滤波。



如图1所示, 取参考信号与被测信号同频。设 $u_s(t) = U_M \sin(\omega t + \alpha)$ 表示被测信号, $u_{REF}(t) = U_R \sin(\omega t + \beta)$ 表示参考信号, 则有:

$$u_o(t) = u_s(t) \cdot u_{REF}(t) \\ = \frac{1}{2} U_M U_R [\cos(\alpha - \beta) - \cos(2\omega t + 2\alpha)] \quad (1)$$

若参考信号与被测信号同相, 即 $\alpha = \beta$, 代入式(1)则有:

$$u_o(t) = \frac{1}{2} U_M U_R [1 - \cos(2\omega t + 2\alpha)] \quad (2)$$

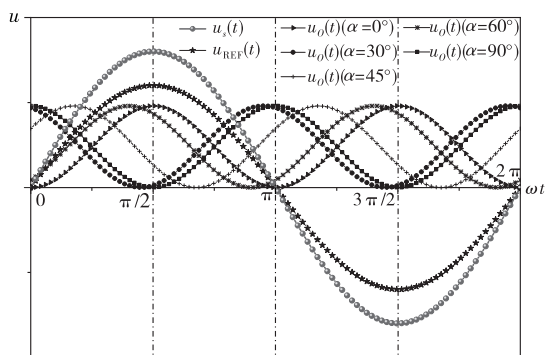


图2 被测信号与参考信号同频同相时
输入输出信号波形图

以 α 为参变量依据式(2)绘制 $u_o(t) - \omega t$ 波形图, 如图2所示分别绘制了 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\alpha = 90^\circ$ 的输出信号 $u_o(t)$ 的波形图, 由图2可看出 $\alpha = \beta$ 时, 只有 $\alpha = 0^\circ$ 或 $\alpha = 180^\circ$ 时, 输出信号能够反映输入信号的变化趋势。

若被测信号与参考信号同频反相, 即 $\alpha = \beta + \pi$, 代入式(1)则有:

$$u_o(t) = \frac{1}{2} U_M U_R [-1 + \cos(2\omega t + 2\alpha)] \quad (3)$$

以 α 为参变量依据式(3)绘制 $u_o(t) - \omega t$ 波形图, 如图3所示分别绘制了 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\alpha = 45^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 、 $\alpha = 90^\circ$ 的输出信号 $u_o(t)$ 的波形图, 由图3可看出 $\alpha = \beta + \pi$ 时, 只有 $\alpha = 0^\circ$ 或 $\alpha = 180^\circ$ 时, 输出信号能够反映输入信号的变化趋势。

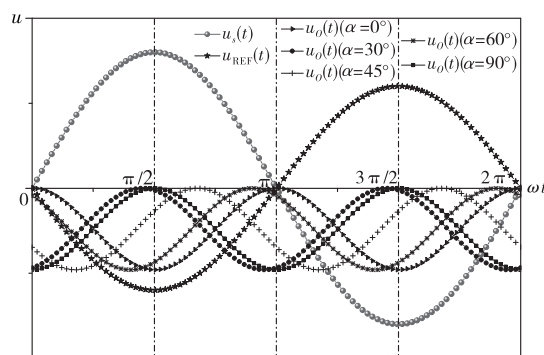


图3 被测信号与参考信号同频反相时
输入输出信号波形图

若被测信号与参考信号同频, 但既不同相也不反相时, 取 $\alpha = \beta + \pi/2$, 绘制波形图如图4所示, 输出信号都不能够反映输入信号的变化趋势。

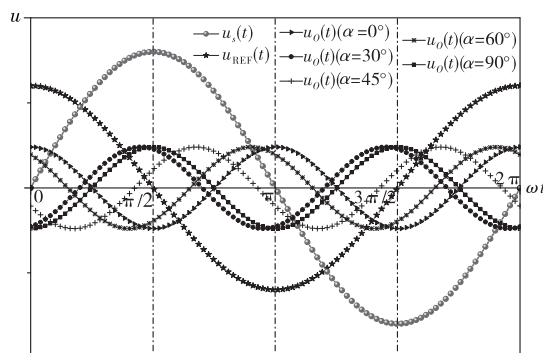
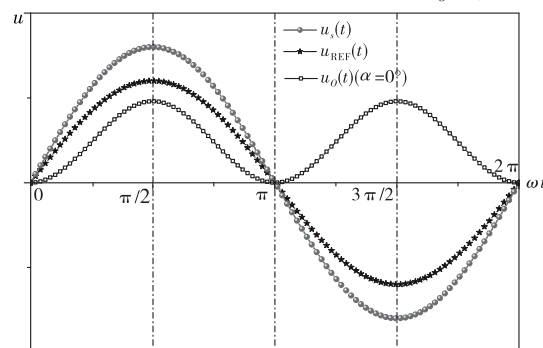


图4 被测信号与参考信号既不同相也不反相时
输入输出信号波形图 (取 $\alpha = \beta + \pi/2$)

因此, 传感器信号经过相敏检波之后的输出信号要反映输入信号的变化趋势, 需要选择与输入信号同频反相或同相的参考电压, 所得相敏检波输出信号为如图5所示周期性正弦波信号 $u_o(t)$ 。



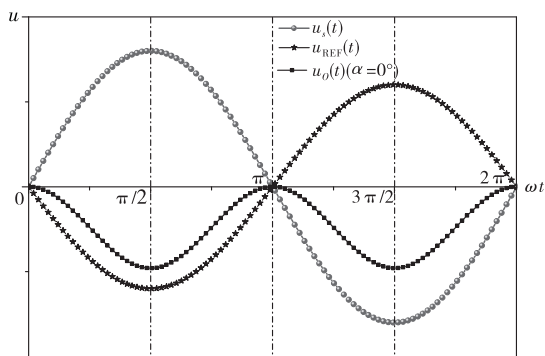


图5 相敏检波目标输出信号

信号经过相敏检波后,可能夹杂着不同频率和幅度的噪声或者其他干扰信号,需要进行滤波处理^[10]。将图5所得正弦波信号 $u_o(t)$ 表示为函数:

$$f(t) = V_m \sin(\pi t), 0 \leq t \leq 1$$

当表示成指数傅里叶级数时,

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t}, \omega_0 = \frac{2\pi}{T} (T=1)$$

$$F_n = V_m \int_0^1 \sin(\pi t) e^{-jn\omega_0 t} dt = \frac{-2V_m}{\pi(4n^2 - 1)}$$

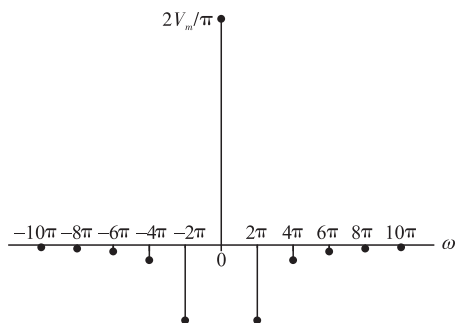


图6 整流后正弦波的线频谱

图5所示PSD整流后的正弦波 $u_o(t)$,画出其幅度频谱如图6所示,其幅度频谱图由离散的频谱线组成,垂线的高度和相应频率分量的幅度成正比, $\omega = 0$ 的分量垂线最高 $F_0 = 2V_m/\pi$,因此可以滤除高频分量保留 $\omega = 0$ 的分量,用其幅度来描述信号。

经过上述分析计算,线性位移检测系统需通过PSD对LVDT的输出信号进行整流,再经低通滤波器滤除高频分量,得到一个能反映输入位移信号变化的输出电压信号。

2 信号调理电路设计

2.1 相敏检波器设计

相敏检波器的主要工作任务是实现信号的全波整流。电路原理图如图7所示,由两级运算放大器(LM311和 $\mu A741$)、一个场效应管(2SK170)以及

若干电阻、电容等外围电路组成。

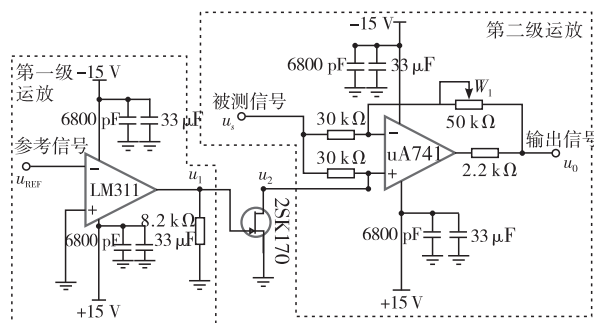


图7 相敏检波器原理图

如图7所示,第二级运放电路通过控制A点的通断来实现被测信号的全波整流。设被测信号(运放 $\mu A741$ 的反相输入端)的电压为 $u_s(t)$,同相输入端口的电压为 $u_+(t)$ 。利用叠加定理可求出运放的输出电压 $u_o(t)$ 与被测信号的关系如式(4)所示:

$$u_o(t) = -\frac{W_1}{R_4} u_s(t) + \left(1 + \frac{W_1}{R_4}\right) u_+(t) \quad (4)$$

当A点与地接通时, $u_+(t) = 0$,代入式(4),

$$u_o(t) = -\frac{W_1}{R_4} u_s(t), \text{若取 } W_1 = R_4, \text{则:}$$

$$u_o(t) = -u_s(t) \quad (5)$$

此时第二级运放就是一个反相放大器,输出电压与被测电压等幅反相。

当A点断开时, $u_+(t) = u_s(t)$,代入式(4),运放的输出与输入信号的关系如式(6)所示:

$$u_o(t) = -\frac{W_1}{R_4} u_s(t) + \left(1 + \frac{W_1}{R_4}\right) u_s(t) = u_s(t) \quad (6)$$

此时第二级运放就是一个电压跟随器,输出电压与被测电压等幅同相。

式(5)和(6)是结果,A点的通断是关键,选用场效应管2SK170来控制。2SK170的额定电流为10mA,最大漏极电压为40V,可适应高电流大电压传输。如图8所示传输特性曲线,当 V_{GS} 小于夹断电压 V_p 时,场效应管截止,A点断开;当 $V_{GS} = 0$ 时,场效应管饱和和导通。A点相当于与地接通。

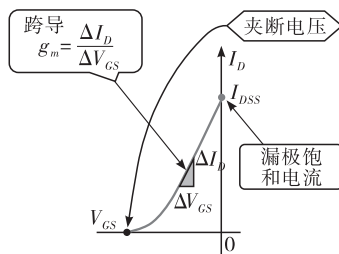


图8 N沟道结型场效应管的传输特性

如图 7 所示,2SK170 的源极接地,提供合适栅极电压来影响 V_{GS} 控制场效应管的工作状态是第一级运放电路的任务。

采用 LM311 作为第一级运放,如图 7 所示第一级运放工作在开环状态下,是一个电压比较器,其功能是对输入的参考信号 u_{REF} 进行整形。其工作原理是比较两个输入信号的电压大小,输出高或低电平信号。

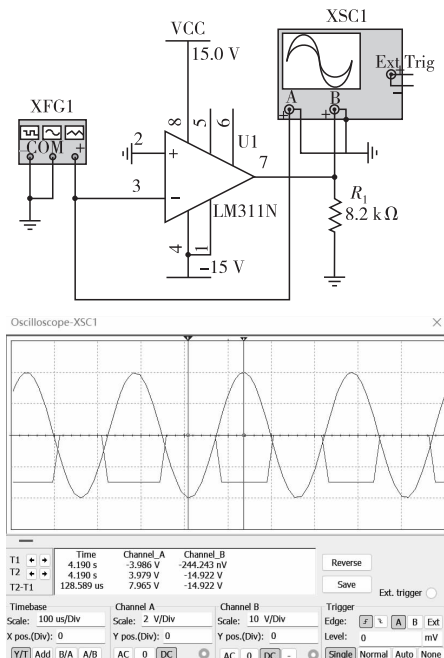


图 9 第一级运放的 Multisim 仿真

若输入参考信号 u_{REF} 为正弦交流信号如图 9 所示加载到运放的反相输入端,同相输入端接地,则在运放的输出端得到输出信号 u_1 是一个与参考信号 u_{REF} 极性相反的方波信号,当 u_{REF} 在正半周时输出 u_1 为一个幅值近似为零的信号,即高电平;当 u_{REF} 在负半周时输出 u_1 为一个幅度接近于负电源电压的信号,即低电平。

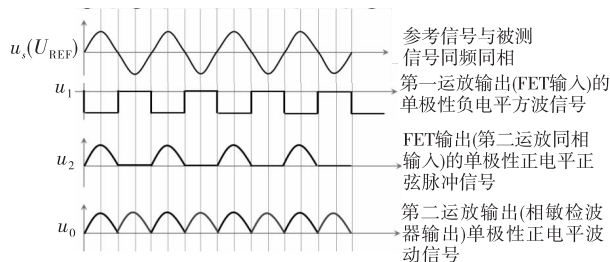


图 10 参考信号与被测信号同频同相时测试点的波形图

综上所述,相敏检波器电路如图 7 所示,由两级运算放大器、一个场效应管以及若干电阻、电容等外围电路组成。当输入参考信号 u_{REF} 是一个与被测信号 u_s 同频同相的正弦信号时,第一运放输出 u_1 是一

个单极性负电平方波信号,高电平近似为零,低电平接近负电源电压。场效应管 2SK170 输出 u_2 的是一个单极性正电平正弦脉冲信号,饱和导通时 A 点相当于与地接通,截止时 A 点断开。第二级运放输出信号 u_0 是一个单极性正电平脉冲信号。A 点断开时,第二级运放电路等效电压跟随器, u_0 与 u_s 等幅同相;A 点与地接通时,第二级运放电路等效反相放大器, u_0 与 u_s 等幅反相。在图 10 中分别给出了与被测信号 u_s 同频同相的参考信号 u_{REF} 、第一级运放的输出信号 u_1 、FET 的漏极输出信号 u_2 以及第二级运放的输出 u_0 (相敏检波器的输出) 波形图。

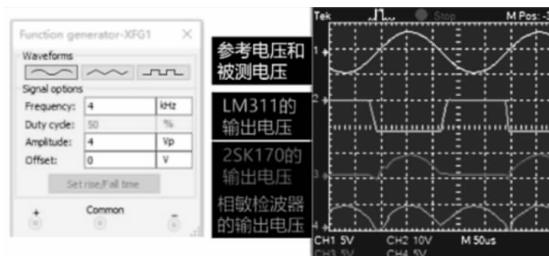


图 11 电路仿真结果

利用 Multisim 绘制图 7 电路仿真,得仿真结果图 11 所示。对比图 11 和图 10,仿真结果验证了分析结果。

输入参考信号 u_{REF} 与被测信号 u_s 频反相时,采用与上述同样的分析方法,可以得到图 12 所示的波形图,其输出 u_0 是一个单极性负电平脉冲信号。

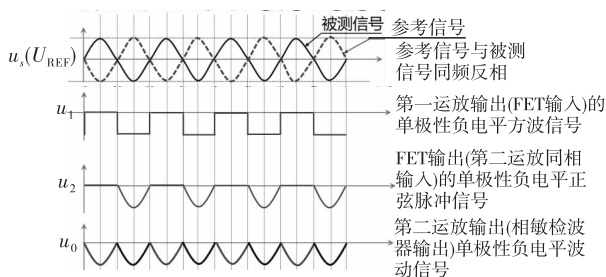


图 12 参考信号与被测信号同频反相时测试点的波形图

当参考信号 u_{REF} 与被测信号 u_s 同频同相时,相敏检波输出 u_0 是一个正极性的正弦脉动信号;当参考信号 u_{REF} 与被测信号 u_s 同频反相时,相敏检波输出 u_0 是一个负极性的正弦脉动信号。满足图 5 分析得出的检测系统检波目标。图 7 所示相敏检波器实现了输出电压的极性是随参考信号的相位变化的检波电路。

2.2 五阶低通滤波器设计

低通滤波器采用基于归一化表的有源 LPF 设计方法。如图 13 所示五阶有源低通滤波器的电路图。

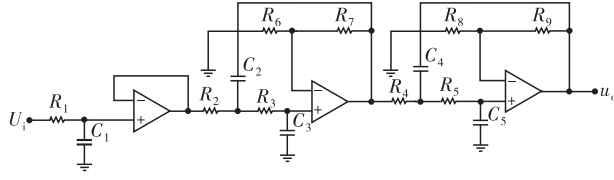


图13 五阶有源低通滤波器的电路图

结合巴特沃斯 LPF 归一化表,其参数可由下列公式(7)至(11)计算得出:

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C_f \quad (7)$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 \quad (8)$$

$$R_6 = R_8 = 5.1 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

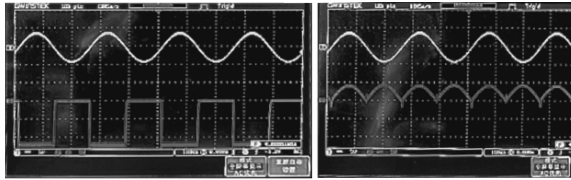
$$R_7 = \left(2 - \frac{1}{Q_2}\right) R_6 = \left(2 - \frac{1}{0.618\ 034}\right) R_6 \quad (10)$$

$$R_9 = \left(2 - \frac{1}{Q_3}\right) R_8 = \left(2 - \frac{1}{1.618\ 034}\right) R_8 \quad (11)$$

本线性位移检测信号调理电路中 LPF 取 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 20 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 0.2 \text{ }\mu\text{F}$, $R_6 = R_8 = 5.1 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 2 \text{ k}\Omega$, $R_9 = 7 \text{ k}\Omega$ 。

3 系统测试与性能分析

线性位移检测信号调理电路主要由图7所示相敏检波电路和图13所示 LPF 组成,设计、制作 PCB,被测信号 u_s 选取与参考信号 u_{REF} 同频同相,用示波器显示信号波形如图14所示。从图可看出,当 u_s 与 u_{REF} 同频同相且占空比为 1:1 时,输出电压信号 u_o 占空比亦是 1:1。



上方: 输入信号(参考信号和被测信号) 上方: 输入信号(参考信号和被测信号)
下方: LM311的输出电压 下方: 相敏检波器的输出电压

图14 全波整流示波器测试结果

图15为为 PSD 和 LPF 联合调试的仿真结果。被测信号 u_s 与同频同相、第一级运放的输出信号、FET 的漏极输出信号、以及第二级运放的输出(相敏检波器的输出)

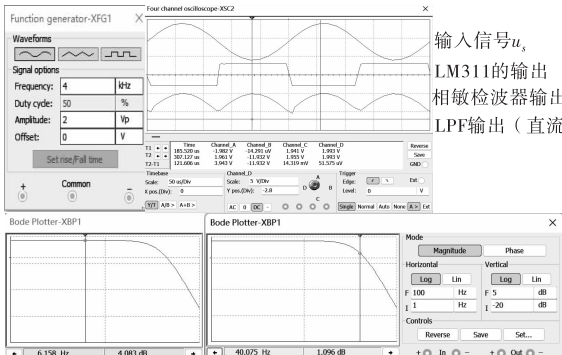


图15 PSD + LPF 仿真结果

相敏检波输入参考信号 u_{REF} 经过 LM311 后输出占空比为 1:1 的方波 u_1 , 经场效应管的开关控制第二级运放输出脉动直流 u_o , 然后通过低通滤波器滤除高频分量, 得到一个能反映输入位移信号变化的输出电压信号, 完成对传感器 LVDT 输出信号的调理。

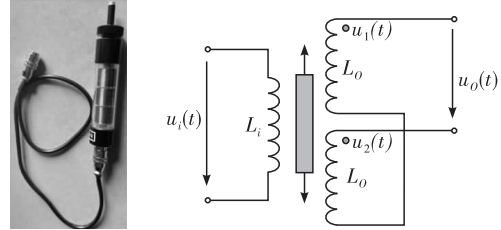


图16 差分变压器的实物及其原理图

LVDT 的结构主要由 3 个部分组成: 1 个铁芯、1 个初级线圈和 2 个次级线圈, 实物及其原理如图16所示。设加在差分变压器初级线圈的激励信号 $u_i(t) = U_m \cos(\omega t)$, 则在次级线圈产生的 2 个感应信号分别为 $u_1(t) = U_{1m} \cos(\omega t)$, $u_2(t) = U_{2m} \cos(\omega t)$ 。

差分变压器的 2 个次级的同名端分别接到差分放大器的同相输入端和反相输入端, 设输入信号用式(12)表示, 差分放大器的输出用式(13)表示。

$$\begin{cases} u_1(t) = U_{1m} \cos(\omega t) \\ u_2(t) = U_{2m} \cos(\omega t) \end{cases} \quad (12)$$

$$u_o(t) = u_1(t) - u_2(t) = (U_{1m} - U_{2m}) \cos(\omega t) \quad (13)$$

当铁芯位于 2 个次级线圈的中心位置时, $U_{1m} = U_{2m}$, $U_o(t) = 0$; 当铁芯向上移动时, $U_{1m} > U_{2m}$, LVDT 的输出用式(13)表示; 当铁芯向下移动时, $U_{1m} < U_{2m}$, LVDT 的输出用式(14)~(15)表示。式(14)和(15)的幅值反映了位移的大小, 正负号反映了铁芯位移的方向。

$$u_o(t) = (U_{1m} - U_{2m}) \cos(\omega t) = U_m \cos(\omega t) \quad (14)$$

$$u_o(t) = (U_{1m} - U_{2m}) \cos(\omega t) = -U_m \cos(\omega t) \quad (15)$$

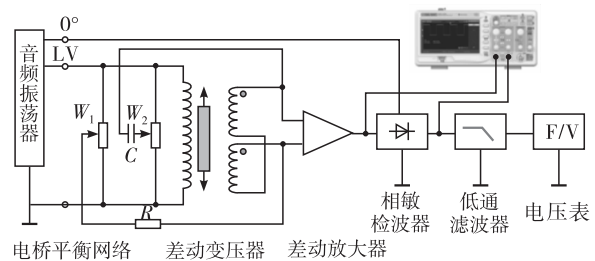


图17 LVDT 线性位移测量实验电路

采用图16所示的 LVDT 线性位移测量实验电

路如图 17 所示,由差分变压器、测微头、差分放大器、相敏检波器、低通滤波器、示波器及直流电压表组成。每隔 0.05 mm 测试一个数据,形成输出输入特性曲线如图 18 所示。

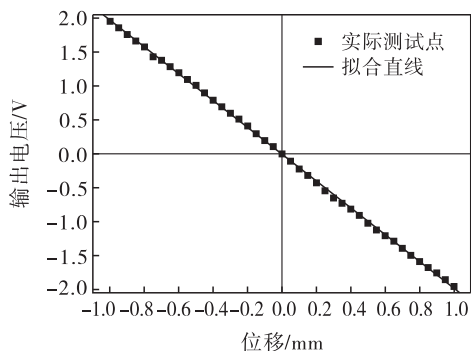


图 18 输出输入特性曲线

经 origin 线性拟合,得到拟合直线:

$$y = -1.976\,72x - 0.009\,5$$

标准差 $RSD = 0.021\,27$ 。

传感器量程为 $-1\text{ mm} \sim 1\text{ mm}$,灵敏度: $K =$

$$-1.976\,72\text{ V/mm}, \text{线性度 } \gamma = \frac{(\Delta U_{\text{out}})_{\text{max}}}{Y_{\text{FS}}} \times 100\%,$$

其中 $(\Delta U_{\text{out}})_{\text{max}}$ 为传感器实际输出曲线与拟合直线之间最大偏差, Y_{FS} 为传感器满量程输出值。计算得 $\gamma = 0.83\%$ 。

测试结果表明 LVDT 传感器输出的调幅波经本信号调理电路后,能够高精度和高再现性地将 LVDT 的机械位移转换成双极性的直流电压,能输出既反映位移大小,又反映位移极性的测量信号,并减小零点残余电压的影响。

4 结论

信号调理电路是 LVDT 位移传感器测量电路的核心部件,它决定了测试系统的准确度以及弱信号检测水平。该文介绍了一种线性位移测量信号调理电路,主要由相敏检波和低通滤波两部分组成。文中对其工作原理做了理论分析、Multisim 仿真设计与验证,然后设计制作 PCB 电路、使用示波器对各

个电路测试点的波形进行测试。最后将其应用与 LVDT 测位移, LVDT 传感器输出的调幅波经相敏检波器后,能输出既反映位移大小,又反映位移极性的直流脉动信号,脉动信号经过低通滤波器滤除高频噪声后输出一个与被测量呈线性关系的直流电压信号。数据分析位移传感器灵敏度 $S = -1.976\,72\text{ V/mm}$,非线性误差 $\gamma = 0.83\%$,实现了小位移测量。实验结果表明,该相敏检波器具有结构简单、调试方便、抑制噪声能力强、可靠性高等优点,能够实现对信号的准确检测和解调。同时,该设计还具有一定的通用性,可以应用于其他类型传感器的微弱信号测量中。

参考文献:

- [1] 任高林,张学伟,魏强,等.一种自动差动变压器式位移传感器寿命试验台的研制[J].化工自动化及仪表,2021,48(05):441-445+502.
- [2] 吴育德.基于 LVDT 的磁电类传感器设计与优化[J].电子元器件与信息技术,2023,7(09):23-25+42.
- [3] 张元岩,姬胜凯,南静. LVDT 伺服控制一体化模块的设计与实现[J].企业科技与发展,2023(09):71-74.
- [4] 蔡天德,谢东辉,纪珍珍.差动变压器式测缝计在大坝变形监测中的应用分析[J].陕西水利,2022(03):189-191.
- [5] 何瑶,段雨涵,隋丽,等.侵入引信用磁电传感器的输出特性仿真分析[J].装备环境工程,2022,19(11):18-26.
- [6] 董春雷,保昆雁,黄宇翔,等.木材静曲蠕变成套测试系统的研发[J].林业工程学报,2021,6(01):147-154.
- [7] 王德华,王华青,庞富胜.加性相敏检波及其电路实现[J].自动化仪表,2000(03):43-45.
- [8] 刘子东,赵艾青.一种位移测量差动变压器传感器信号处理电路的设计[J].集成电路应用,2019,36(04):17-20.
- [9] 李佰明,袁杰,王坤东,等.振荡电路式 LVDT 测量系统设计[J].电子测量与仪器学报,2023,37(02):83-89.
- [10] 刘懿,郝思忠,田玉琳,等.二维相敏检波器及其在调幅图像解调中应用[J].物理学报,2019,68(22):316-327.
- [11] 李彬,张晓朋,吴媛媛,等.基于 Multisim 的电感传感器信号测量系统仿真[J].工具技术,2023,57(08):142-146.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49

国际发行代号:BM529

定价:18.00 元/期 108.00 元/年

地址:西安市高新区沣惠南路 8 号

邮编:710075

电话:029-81871277

网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com>

电子邮箱:gyybbjb@126.com