

DOI:10.19650/j.cnki.cjsi.J2413279

LVDT 位移传感器数字调理及相位补偿方法研究*

强彦,任娅婵,云彤彤,陈雨欣,魏列江

(兰州理工大学能源与动力工程学院 兰州 730050)

摘要: LVDT 位移传感器铁芯偏离中心位置时会产生非 180° 相位差, 导致其两个次级线圈输出信号幅值相减时出现错位, 进而造成调路线性度偏差。针对这一问题, 本文提出了一种基于离散希尔伯特变换的数字调理及相位差补偿方法, 结合数字移动平均滤波和巴特沃斯低通滤波等数字措施实现信号的多层次滤波和处理, 确保信号平滑且有效去除噪声。该方法能够精确补偿 LVDT 位移传感器铁芯偏离中心位置时产生的非 180° 相位差, 并实现其输出信号的数字化调理。实验结果表明, 本文提出的数字方法理论非线性度为 $\pm 0.076\%$, 实验非线性度为 $\pm 0.093\%$, 相较于 LVDT 配套的模拟调理电路的非线性度 $\pm 0.2\%$, 有明显改善。该方法不仅在理论上证明了其有效性, 同时在实际应用中也展示了其优越性。

关键词: LVDT 位移传感器; 信号调理; 离散希尔伯特变换; 相位差补偿; 数字信号处理

中图分类号: TH703 TN713 TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40 510.40

Research on digital adjustment and phase compensation methods for LVDT displacement sensors

Qiang Yan, Ren Yachan, Yun Tongtong, Chen Yuxin, Wei Liejiang

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: When the core of an LVDT displacement sensor deviates from its central position, a non 180° phase shift is induced, causing a mismatch in the amplitudes difference of the output signals from the two secondary coils. This, in turn, leads to a linearity deviation in the signal conditioning circuitry. To address this issue, this paper proposes a digital conditioning and phase compensation method based on discrete Hilbert transform. This method integrates digital moving average filtering and Butterworth low-pass filtering to achieve multi-level signal filtering and processing, ensuring smooth signal output while effectively reducing noise. It accurately compensates for the non 180° phase shift that occurs when the iron core of the LVDT displacement sensor deviates from the central position, and realizes the digital conditioning of its output signals. Experimental results indicate that the theoretical non-linearity of the proposed digital method is $\pm 0.076\%$, while the experimental non-linearity is $\pm 0.093\%$, showing a significant improvement compared to the non-linearity of $\pm 0.2\%$ in conventional analog conditioning circuits for LVDT sensors. This method not only demonstrates theoretical validity but also exhibits superior performance in practical applications.

Keywords: LVDT displacement sensor; signal conditioning; discrete Hilbert transform; phase difference compensation; digital signal processing

0 引言

差动变压器式位移传感器 (linear variable differential transformer, LVDT), 是将位移量转化为电信号的传感器。其凭借简单可靠的结构、较长的使用寿命、较高的准确性

与灵敏度、强大的环境适应能力等诸多优点, 在各领域得到了广泛应用^[1]。

位移信号精度不仅受位移传感器结构和工艺影响, 其信号调理电路也对其精度产生重要影响。LVDT 信号调理方法主要分为模拟信号调理和数字信号调理两类。其中模拟信号调理电路中分立元件数目较多, 容易受温、湿度

收稿日期: 2024-09-13 Received Date: 2024-09-13

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB3403002) 项目资助

影响,难以实现高度集成化。而数字信号调理电路中元件数目较少、能够实现非线性补偿、且易于系统集成^[2]。目前在本领域一般采用逻辑电路集成于芯片内,通过配套电路来实现信号调理功能,如广泛使用的 AD598、AD698^[3] 等芯片。但在实际应用中存在发热量大、温度升高影响精度的问题,且不能编程,不具备非线性校正能力。因此,进行高精度信号数字调理成为本领域的主要研究方向。

LVDT 两个次级线圈感应信号是由磁通量变化引起的,其相位和频率由初级线圈电流决定。在 LVDT 传感器铁芯运动过程中,存在电磁耦合的非对称性、电感效应、材料非线性、电气参数的分布效应、线圈的非理想性、边缘效应和磁滞效应(磁场强度与磁感应强度的滞后现象),由于这些复杂效应的相互作用,直接影响磁通量变化率。磁通量变化速率增加导致感应电动势的响应时间提前,其本质在于电感的增加和电磁耦合效应的增强。这些因素使得线圈对电流变化的敏感度提高,从而使感应电动势更早出现,并且这些因素在实际应用中无法完全消除。所以如何利用高精度数字调理技术的介入来消除以上偏差,成为本领域亟待解决的技术问题。

LVDT 数字调理电路通常采用特定算法来计算次级线圈输出电压信号的幅值或加权值。目前常用的正弦波信号幅值估值数字算法包括最小均方差法、快速傅里叶

变换(fast fourier transform, FFT)^[4-5]和三点估值法等。然而,这些方法仅考虑了幅值部分,并未解决由于 LVDT 位移传感器铁芯位置偏离中心时产生的非 180°相位差所引起的复杂误差问题。这种相位差现象对数字调理的线性度产生了不可避免的影响,导致现有的幅值估值数字算法在实际应用中存在一定的局限性。

针对上述问题,本文提出了一种离散希尔伯特变换^[6-10]和相位补偿技术,有效消除了铁芯位置偏移产生的非 180°相位差所导致的信号幅值偏差。同时采用数字移动平均滤波和巴特沃斯低通滤波等数字措施实现信号的多层次滤波和处理,确保信号平滑且有效去除噪声。该方法为高精度位移测量和调理提供了一种新的解决方案。

1 基于离散希尔伯特变换的数字调理及相位补偿方法

1.1 非 180°相位差引起的幅值计算偏差现象

如图 1 所示,当 LVDT 位移传感器铁芯偏离中心位置时, LVDT 位移传感器的两个次级线圈输出信号 S1 和 S2 之间的相位差不再是理想的 180°。这一相位差对数字调理过程中的幅值计算造成了偏差,进而不可避免地影响到调理电路的整体线性度。

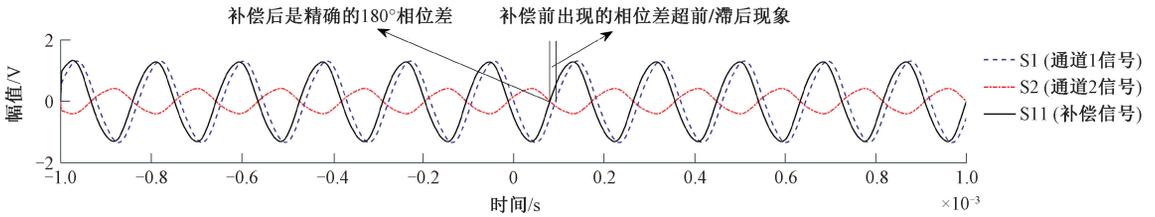


图 1 非 180°相位差引起的幅值差偏差现象

Fig. 1 Amplitude difference deviation phenomenon caused by non 180° phase difference

本文通过计算 S1 和 S2 的瞬时相位差,并对 S1 进行相位补偿生成 S11,从而将 S11 与 S2 之间的相位差调整至精确的 180°。这一方法有效消除了铁芯位置偏移引起的非 180°相位差及其带来的信号幅值计算偏差,显著改善了调理电路的线性度。

1.2 希尔伯特变换及其离散形式

希尔伯特变换是一种将信号从实数域转换到复数域的变换,它的主要目的是生成一个解析信号(analytic signal)^[11]。

对于一个连续的信号 $s(t)$ 的希尔伯特变换定义为式(1),即 $H[s(t)]$ 是连续信号 $s(t)$ 与 $\frac{1}{\pi t}$ 的卷积。

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(t - \tau)}{\tau} d\tau =$$

$$s(t) \frac{1}{\pi t} \quad (1)$$

构造解析信号:

$$z(t) = s(t) + jH[s(t)] \quad (2)$$

在解析信号式(2)中,实部是原始信号,虚部是其希尔伯特变换,希尔伯特变换 3D 空间示意如图 2 所示。

基于希尔伯特变换的解析信号,其离散形式为:

$$z[n] = s[n] + jH[s(n)] \quad (3)$$

于是可以得到幅值函数 $\alpha[n]$ 和相位函数 $\phi[n]$:

$$\alpha[n] = \sqrt{s^2[n] + H^2[s(n)]} \quad (4)$$

$$\phi[n] = \arg(z[n]) = \tan^{-1} \left(\frac{H[s(n)]}{s[n]} \right) \quad (5)$$

利用离散希尔伯特变换,可以从幅值和相位精确的解析和调理信号,并进行精确的相位补偿。

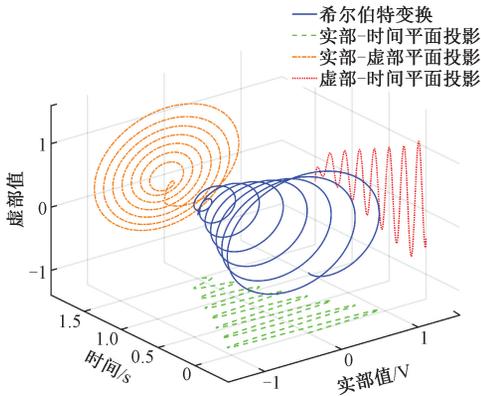


图2 希尔伯特变换三维可视化

Fig.2 Hilbert transform 3D visualization

1.3 数字移动平均滤波器

数字移动平均滤波常用于传感器数据平滑、噪声过

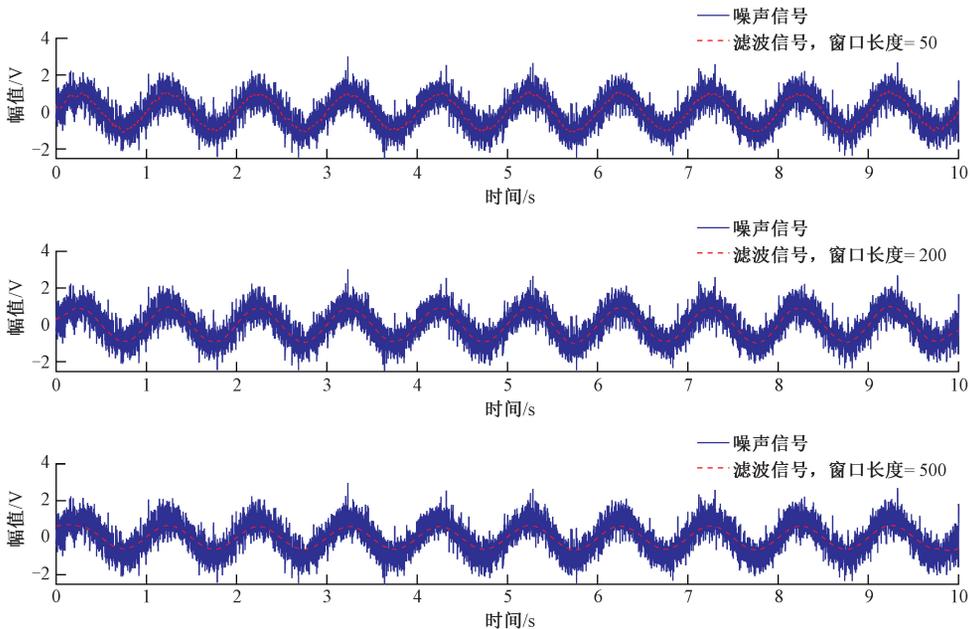


图3 不同窗口大小下的移动平均滤波原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of moving average filtering principle under different window sizes

滤滤波器^[12],即没有波纹,能够有效地去除高频噪声,同时保留低频信号。适用于本数字调理方法中去除高频噪声而保留信号的直流分量的需求。

巴特沃斯低通滤波器的幅频响应为式(7)^[13]。其只需要两个参数表征,滤波器的阶数 n 和-3 dB处的截止频率 ω_c 。

$$|H_{(j\omega)}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (7)$$

式中: n 表示滤波器阶数; ω 为角频率; ω_c 是截止角频率;

滤和增强信号特征。其基本思想是通过计算一定时间窗口内数据的平均值来减小噪声,平滑数据曲线,同时保留趋势信息。

移动平均滤波器的输出是输入信号的 N 个连续样本的平均值。对于一个离散时间信号 $x[n]$,其移动平均滤波后的输出 $y[n]$ 可以表示为:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[n-k] \quad (6)$$

式中: n 为当前时刻; k 为窗口内的样本偏移; N 是窗口长度,表示用于计算平均值的连续数据点的数量。

移动平均滤波核心是根据采样率和激励信号的频率确定数字移动平均滤波的窗口大小,以最佳化信号平滑效果。如图3所示,数字移动平均滤波的窗口太小会使滤波不平滑,窗口太大会影响波形幅值。

1.4 数字巴特沃斯低通滤波

巴特沃斯滤波器是一种具有最大平坦幅度响应的低

ε 为最大通带增益,如果在截止频率-3 dB的频率下定义,则 ε 等于1, ε^2 也为1。

如图4所示为不同阶数和截止频率的数字巴特沃斯低通滤波实现的原理示意图,其核心是根据产生的半波信号的频率确定巴特沃斯低通滤波器的滤波器阶数 n 和截止频率 ω_c ,以最佳化信号平滑效果。

1.5 基于离散希尔伯特变换的数字调理及相位补偿方法

针对LVDT位移传感器在铁芯位置偏离中心时产生的非180°相位差所引起的现象。本文提出了基于离散希尔伯特变换的LVDT位移传感器数字调理及相位补偿

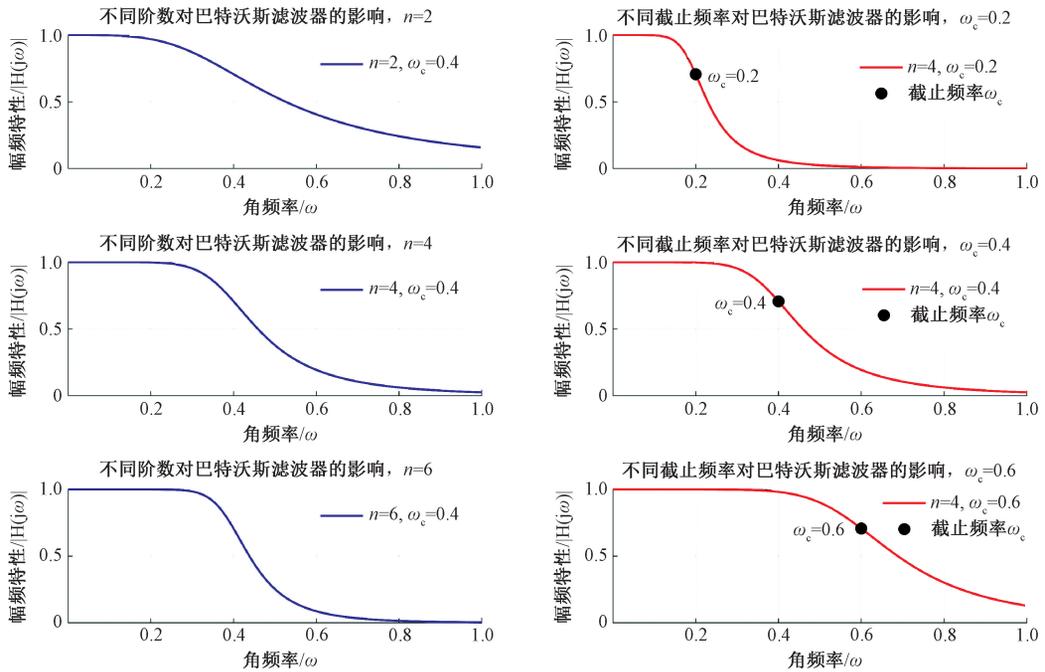


图 4 巴特沃斯滤波器不同阶数和截止频率的对比分析

Fig. 4 Butterworth filters comparative analysis of various orders and cutoff frequencies

算法。算法的主要步骤如下。

- 1) 产生正弦波作为 LVDT 激励信号;
- 2) 同步采样 LVDT 位移传感器输出的的两路信号;
- 3) 数字移动平均滤波。

对两路信号数字移动平均滤波得 S1 数据和 S2 数据;信号经过数字移动平均滤波以滤除噪声、平滑信号;数字移动平均滤波的窗口大小根据采样率和激励信号的频率确定,以最佳化信号平滑效果。

- 4) 离散希尔伯特变换;

对信号 S1 数据和 S2 数据进行离散希尔伯特变换,得到复信号 S1 变换数据和 S2 变换数据;

- 5) 相位补偿;

计算 S1 变换数据和 S2 变换数据的瞬时相位差,并对 S1 变换数据进行相位补偿得到 S11 变换数据,使 S11 变换数据与 S2 变换数据之间的相位差调整为 180° (动态补偿);

- 6) 结合符号形成半波;

提取 S11 变换数据和 S2 变换数据的实部并结合符号形成半波;当铁芯从中间位置向次级线圈 1 方向移动时,次级线圈 1 与初级线圈的互感量增加,感应电动势升高。次级线圈 2 与初级线圈的互感量减小,感应电动势降低^[14]。即 $|S11| > |S2|$, 幅度绝对值差为 $|S11| - |S2|$, 这种情况下定义取负号,最终的半波信号 Q1 为 $-(|S11| - |S2|)$ 。

当铁芯从中间位置向次级线圈 2 方向移动时,次级

线圈 2 与初级线圈的互感量增加,感应电动势升高。次级线圈 1 与初级线圈的互感量减小,感应电动势降低^[14]。即 $|S2| > |S11|$, 幅度绝对值差为 $|S2| - |S11|$, 这种情况下定义取正号,最终的半波信号 Q1 为 $|S2| - |S11|$ 。

- 7) 数字巴特沃斯低通滤波并计算平均值;

对形成的半波信号 Q1 进行巴特沃斯数字滤波和平均值计算。进行巴特沃斯数字滤波后输出低通滤波平滑曲线 Q2, 计算平均值后即输出平均值曲线 Q3。

2 数字补偿调理算法调试

2.1 算法参数确定

为了确定所提数字方法的具体参数,使用示波器采集实际 LVDT 位移传感器两个次级线圈的输出波形数据。LVDT 位移传感器量程范围为 ± 8 mm, 对每 1 mm (0~16 mm) 的位移记录一次示波器的输出波形,共获得 17 组波形数据。用上述所提的数字方法处理这 17 组波形,采用 Matlab 的信号处理工具箱对每一步骤的波形进行精确调试,确定数字算法里面的具体参数。

图 5 展示了 LVDT 位移传感器信号处理的各个步骤。图 5(a) 显示了 LVDT 输出的原始信号,随后通过图 5(b) 同步数字移动平均滤波,确定最佳窗口大小为 205,以降低噪声。图 5(c) 使用离散希尔伯特变换进行相位差计算和动态补偿,消除了铁芯位置偏移引起的相

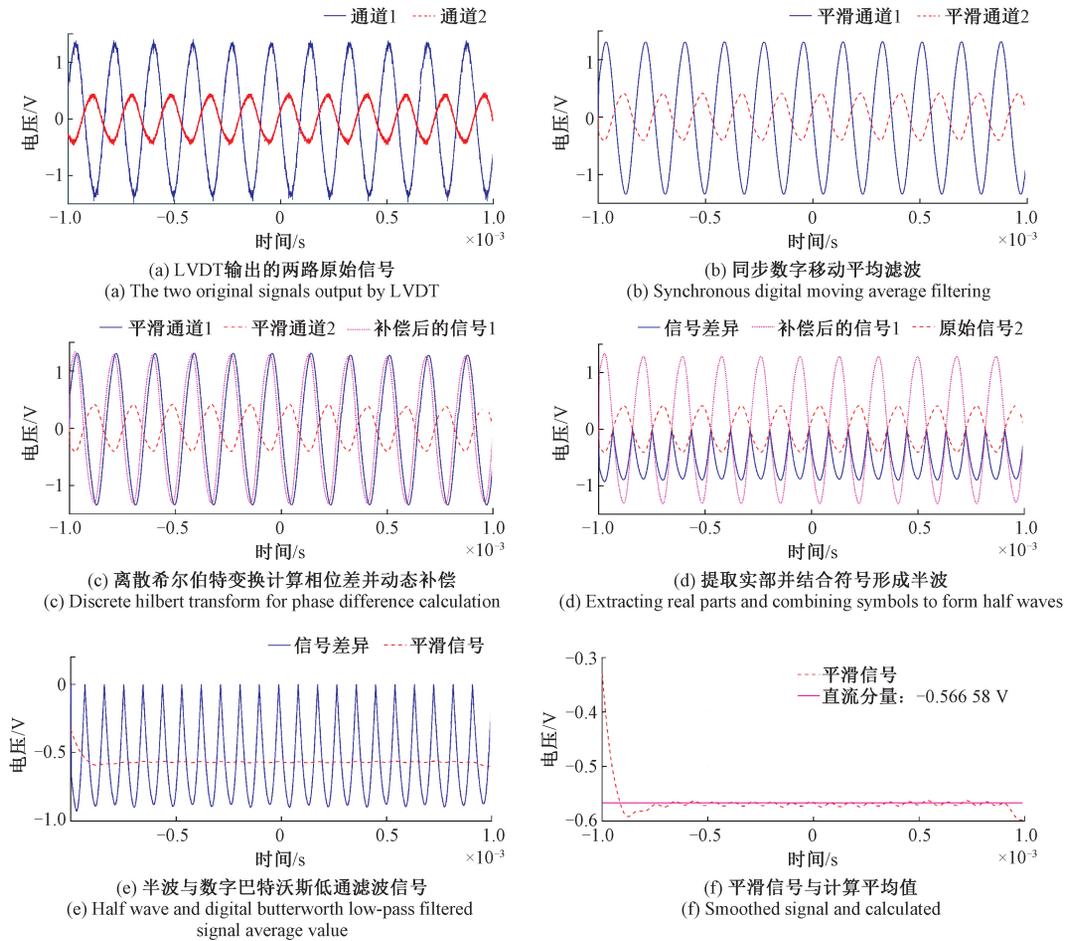


图5 基于离散希尔伯特变换的LVDT位移传感器数字调理及相位补偿方法各个步骤曲线

Fig. 5 The curves of each step in the digital conditioning and phase compensation method for LVDT displacement sensors based on discrete hilbert transform

位误差。图5(d)通过提取信号实部并结合符号信息生成半波,将方向信息嵌入位移测量。图5(e)数字巴特沃斯低通滤波器优化了信号,最佳参数为二阶、截止频率0.07 Hz。最后,图5(f)通过计算滤波信号的平均值,有效去除了低频漂移,使信号更加平滑稳定。

2.2 调理结果

采用所提的数字调理方法对17组波形数据进行处理,得到了与LVDT传感器位移信号相对应的调理电压数据,如表1所示。基于调理电压数据分析了传感器位移信号与调理电压之间的线性对应关系及非线性度,如图6所示。

图6(a)展示了示波器的采集数据调理电压与LVDT位移之间的线性回归关系。方块代表实验中示波器采集的数据点,直线代表拟合的线性回归曲线。回归模型公式为 $y = a + bx$,其中截距 a 为 -0.49464 ± 0.00235 ,斜率 b 为 $0.06243 \pm 2.49978 \times 10^{-4}$ 表明LVDT位移与电压呈现高度线性相关性。残差平方和为 3.82432×10^{-4} , Pearson's r 系数为0.99988, R 平方值为0.99976,调整

表1 LVDT位移与采集数据调理电压数值表
Table 1 LVDT displacement and collected data conditioning voltage value table

LVDT位移/mm	示波器的采集数据调理电压值/V	理想曲线调理电压值/V	残差值/V
0	-0.48242	-0.49464	0.01222
1	-0.42955	-0.43221	0.00266
2	-0.37429	-0.36978	-0.00451
3	-0.31357	-0.30735	-0.00622
4	-0.24693	-0.24492	-0.00201
5	-0.18790	-0.18249	-0.00541
6	-0.12259	-0.12006	-0.00253
7	-0.06074	-0.05763	-0.00311
8	0.00218	0.00480	-0.00262
9	0.06547	0.06723	-0.00176
10	0.13354	0.12966	0.00388
11	0.19676	0.19209	0.00467
12	0.25852	0.25452	0.00400
13	0.32218	0.31695	0.00523
14	0.38135	0.37938	0.00197
15	0.44033	0.44181	-0.00148
16	0.49962	0.50424	-0.00462

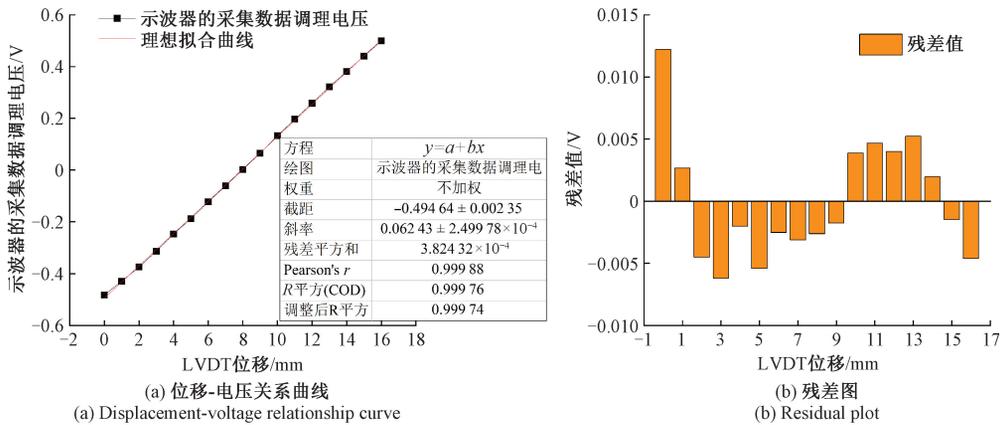


图 6 系统线性度测试结果

Fig. 6 System linearity test results

后的 R 平方值为 0.99974。表明回归模型具有极高的拟合精度。图 6(b) 则展示了残差值的分布情况,表明拟合曲线与实际数据之间的误差。大部分残差值接近于零,表明拟合模型较好地反映了实验数据的整体趋势。纵轴表示残差电压(V),横轴表示 LVDT 位移(mm)。残差的最大值和最小值分别约为 0.01222 V 和 -0.00148 V,整体残差波动较小,证明拟合效果良好。

通过对 17 组不同位移条件下采集的波形数据进行处理,验证了数字移动平均滤波、离散希尔伯特变换、数字巴特沃斯低通滤波器等多层次滤波技术在信号调理中的有效性。

具体而言,该方法的最大偏差值为 0.01222 V, LVDT 测量范围为 16 mm,经计算分析,其调理电路的非线性度为 $\pm 0.076\%$,相较于 LVDT 传感器配套的模拟调理电路的非线性度 ($\pm 0.2\%$) 有显著改善。表明在整个测量过程中,所采用的信号调理和相位差补偿方法能够有效减少误差,提升测量系统的精度。

3 实验验证

为验证所提方法的实际有效性,采用调试后的数字算法,使用 Matlab 设计的上位机系统对 LVDT 位移传感器两个次级线圈在有效量程内的输出信号进行实时调理,并精确分析调理方法的关键性能参数-非线性度,以说明该数字方法在实际应用中的测量性能。

3.1 实验平台搭建及实验环境

LVDT 位移传感器数字调理及相位补偿方法实验平台如图 7 所示, LVDT 位移传感器固定在精度为 0.01 mm 的高精密手动位移平台上,该平台能够实现铁芯在量程范围内的高精度位移调整。实验采用 5.2 kHz、峰峰值为 4.46 V 的正弦波作为 LVDT 的位移传感器激励信号。LVDT 的两个次级线圈输出信号使用 DAQ 设备(NI USB-6002)采集到上位机进行实时地调理并显示直流电压数

值,同时使用示波器对次级线圈的输出信号进行实时监控。其中专用电源给 LVDT 传感器和激励信号电路供电。

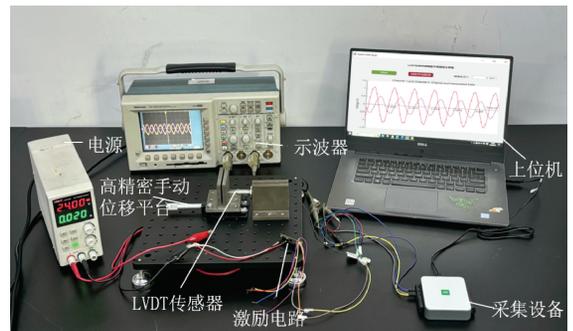


图 7 测试实验台

Fig. 7 Test experiment platform

实验环境具体参数如表 2 所示。

表 2 实验环境

Table 2 Experimental environment

实验环境	参数
LVDT 型号	XLVDTS
LVDT 量程范围	± 8 mm
数字算法及上位机开发系统	MATLAB R2024a
电源电压	+24 V
示波器	Tektronix TDS 3034
高精度位移平台精度	0.01 mm
激励信号	5 kHz、峰峰值为 4.46 V 的正弦波

LVDT 的两路次级线圈输出信号的主频率为 5 kHz。本实验使用 NI 公司的数据采集 (DAQ) 设备 (USB-6002) 采集,该设备的最高的采样频率为 50 kHz,是被采集信号主频的 10 倍,满足 Nyquist 采样定律。

为了进一步验证信号处理的准确性,对采样后的信号采用样条插值^[15-17]方法进行了信号重建。重建效果如图8所示。

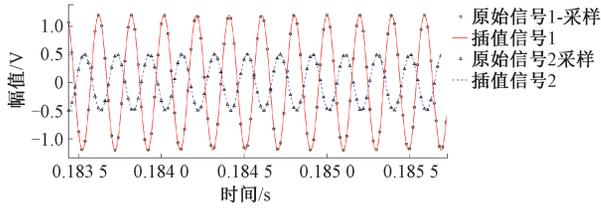


图8 样条插值方法重建效果

Fig. 8 Reconstruction effect of spline interpolation method

3.2 调理结果

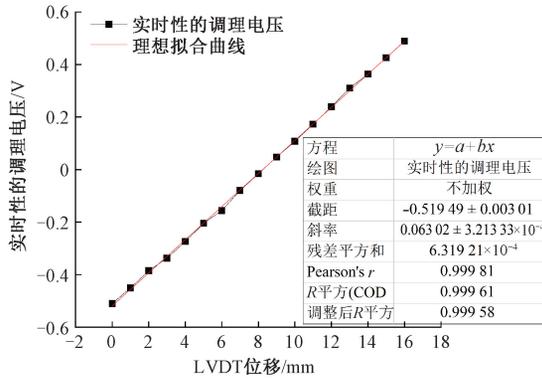
对 LVDT 位移传感器在有效量程内进行实时调理的测试实验,实时调理电压值为3次测量后的平均值,实验数据如表3所示。根据实时调理电压数据分析了传感器位移信号与调理电压之间的线性对应关系及非线性度,如图9所示。

图9(a)展示了实时性的采集数据调理电压与 LVDT 位移之间的线性回归关系。方块代表实时性实验时采集的数据点,直线代表拟合的线性回归曲线。回归模型公式为 $y = a + bx$, 其中截距 a 为 -0.51949 ± 0.00301 , 斜率 b 为 $0.06302 \pm 3.21333 \times 10^{-4}$ 表明 LVDT 位移与电压呈现高度线性相关性。残差平方和为 6.31921×10^{-4} ,

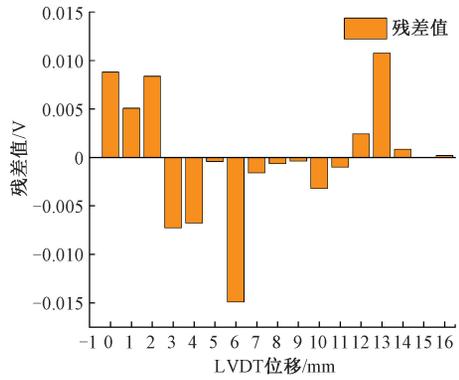
表3 LVDT 位移与实时性的调理电压数值表

Table 3 LVDT displacement and real-time regulation voltage values

LVDT 位移/mm	实时性的调理电压值/V	理想曲线调理电压值/V	残差值/V
0	-0.51070	-0.51949	0.00879
1	-0.45139	-0.45647	0.00508
2	-0.38508	-0.39345	0.00837
3	-0.33770	-0.33043	-0.00727
4	-0.27419	-0.26741	-0.00678
5	-0.20482	-0.20439	-0.00043
6	-0.15630	-0.14137	-0.01493
7	-0.07996	-0.07835	-0.00161
8	-0.01597	-0.01533	-0.000636
9	0.04730	0.04769	-0.000389
10	0.10750	0.11071	-0.00321
11	0.17271	0.17373	-0.00102
12	0.23917	0.23675	0.00242
13	0.31053	0.29977	0.01076
14	0.36363	0.36279	0.00084
15	0.42581	0.42581	-1.11022×10^{-16}
16	0.48903	0.48883	0.00020



(a) 位移-电压关系曲线
(a) Displacement-voltage curve



(b) 残差图
(b) Residual plot

图9 系统线性度测试结果

Fig. 9 System linearity test results

Pearson's r 系数为 0.99981, R 平方值为 0.99961, 调整后的 R 平方值为 0.99958。表明回归模型具有极高的拟合精度。图9(b)则展示了残差值的分布情况,表明拟合曲线与实际数据之间的误差。大部分残差值接近于零,表明拟合模型较好地反映了实验数据的整体趋势。纵轴表示残差电压(V),横轴表示 LVDT 位移(mm)。残差的最大值和最小值分别约为 -0.01493 V 和 -1.11022×10^{-16} V, 整

体残差波动较小,证明拟合效果良好。

利用高精度位移实验平台,对 LVDT 位移传感器的数字调理及相位补偿方法进行了全面验证。采用集成成本文数字方法的上位机对 LVDT 位移传感器的两个次级线圈输出信号在有效量程范围内进行实时调理。实验数据表明,传感器位移信号与调理电压之间表现出良好的线性关系,最大偏差值为 -0.01493 V, 通过进一步计算分

析,验证实验的非线性度为 $\pm 0.093\%$,明显低于 LVDT 传感器配套的模拟调理电路的非线性度($\pm 0.2\%$)。此验证实验不仅在高精度条件下实现了对 LVDT 位移传感器信号的实时调理和准确测量,也表明该数字方法在实际应用中具有优越的测量性能。

4 结 论

本研究提出了一种基于离散希尔伯特变换的 LVDT 位移传感器数字调理及相位补偿方法,系统有效地解决了由于铁芯位置偏离中心引起的非 180° 相位差所导致的复杂误差问题。

通过实验结果表明,该方法显著改善了 LVDT 位移传感器调理电路的非线性度,从 LVDT 位移传感器原有配套模拟调理电路的非线性度 $\pm 0.2\%$ 降低至理论值的 $\pm 0.076\%$ 和实验值的 $\pm 0.093\%$ 。该结果不仅证明了方法在理论上的有效性,也展示了其在实际应用中的优越性能。

在实现该算法的过程中,采用数字信号处理器(digital signal processor, DSP)或 STM32 微控制器(stmicroelectronics 32-bit microcontroller, STM32)等嵌入式处理器是较为成熟且高效的选择。DSP 处理器和 STM32 微控制器因其高采样率和强大的实时处理能力,在工业级信号处理应用中广泛使用。具体来说,STM32 系列处理器的模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)具备高达数百万次每秒的采样速率,以 STM32F4 系列为例,其 ADC 采样率可达 2.4 MSPS(mega samples per second)^[18],而本文提出的数字调理方法根据奈奎斯特定律在采样率大于 5 kHz 的 2 倍即 10 kHz 时就能准确使用,2.4 MSPS 是 5 kHz 的 480 倍。更相比之下,DSP 处理器在处理复杂信号时,往往表现出更强的采样率和计算能力,能够提供更高的实时性和计算精度。因此,这些嵌入式处理器可以有效地支持高精度的实时信号调理,确保满足实际应用中传感器测量时间和精度的严格要求。

将上述数字调理方法应用于产品级的 LVDT 位移传感器时,结合现有的嵌入式技术,该方法能够替代复杂的原有配套模拟调理电路,在保证调理精度和实时性的同时做到小型化和实用化^[19-20]。

此外,该方法在数字滤波器参数调优和应用需求标定方面有较强的灵活性,能够根据不同 LVDT 传感器的型号和性能进行优化。同时也为高精度位移测量和信号调理提供了一个新的技术途径,展示了其在工业测量和精密控制领域的潜在应用价值,具有广阔的应用前景。

参考文献

[1] 田野. LVDT 测量系统及其信号调理电路的设计实

现[D]. 哈尔滨理工大学,2023.

TIAN Y. Design and implementation of LVDT measurement system and its signal conditioning circuit [D]. Harbin University of Science and Technology, 2023.

[2] 刘志才. LVDT 位移传感器数字信号处理算法及电路研究[D]. 浙江大学,2012.

LIU ZH C. Research on digital signal processing algorithm and circuit of LVDT displacement sensor [D]. Zhejiang University, 2012.

[3] 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(2):83-89.

LI B M, YUAN J, WANG K D, et al. Design of an oscillating circuit-based LVDT measurement system [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(2):83-89.

[4] 徐从裕,胡宗久,杨雅茹,等. 基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(5):180-186.

XU C Y, HU Z J, YANG Y R, et al. Ultrasonic phase difference detection method based on FFT and IFFT [J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(5):180-186.

[5] 李浩,王厚军,肖磊,等. 高速并行数字调制信号的产生与实现[J]. 仪器仪表学报,2023,44(2):110-118.

LI H, WANG H J, XIAO L, et al. Generation and implementation of high-speed parallel digital modulation signals [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 110-118.

[6] 沈廷鳌,李明,李华南,等. 基于相关和 Hilbert 变换的科氏流量计相位差估计方法[J]. 仪器仪表学报,2017,38(12):2908-2914.

SHEN T AO, LI M, LI H N, et al. Phase difference estimation method of Coriolis flowmeter based on correlation and Hilbert transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017,38(12):2908-2914.

[7] 何镇安,韩卫芳,王莹,等. 改进希尔伯特-黄变换的荧光寿命温度测量研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(7):85-89.

HE ZH AN, HAN W F, WANG Y, et al. Study on fluorescence lifetime temperature measurement based on improved Hilbert-Huang transform [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021,40(7):85-89.

[8] RAMOS M C, COCA O J, LEON L D L, et al. Electrochemical noise analysis using experimental chaos theory, power spectral density and Hilbert-Huang transform in anodized aluminum alloys in tartaric-phosphoric-sulfuric acid solutions [J]. Metals, 2023,

- 13(11): 1850.
- [9] 周勃,张士伟,陈长征,等. 风力机叶片多裂纹扩展声发射信号的特征识别[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(1):110-117.
ZHOU B, ZHANG SH W, CHEN CH ZH, et al. Feature identification of acoustic emission signals of multiple propagating crack on wind turbine blade[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1):110-117.
- [10] 谷翼策. 多通道干涉 SAR 数据仿真及通道相位误差校正技术研究[D]. 长沙理工大学, 2020.
GU Y C. Research on multi-channel interferometric SAR data simulation and channel phase error correction technology [D]. Changsha University of Science & Technology, 2020.
- [11] 高宏伟,李新成,何晓宁,等. 基于希尔伯特变换的风电机组齿轮箱故障诊断方法研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(9):215-220.
GAO H W, LI X CH, HE X N, et al. Research on fault diagnosis method of wind turbine gearbox based on Hilbert transform [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2024, 52(9): 215-220.
- [12] 黄波. 巴特沃斯数字滤波器的设计与仿真实现[J]. 河南科技, 2021, 40(36):10-12.
HUANG B. Design and simulation of Butterworth digital filter [J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(36): 10-12.
- [13] 岳耀达. 电气连接器缩针检测信号的噪声抑制研究[D]. 中国矿业大学, 2019.
YUE Y D. Research on noise suppression of pin retraction detection signal of electrical connectors [D]. China University of Mining and Technology, 2019.
- [14] 郁明辉. 航空发动机用 LVDT 位移传感器的研究[D]. 南京航空航天大学, 2020.
YU M H. Research on LVDT displacement sensor for aero engines [D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [15] SUN M, LAN L, ZHU CH G, et al. Cubic spline interpolation with optimal end conditions [J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2023, 425: 115039.
- [16] WAN J J, LI ZH, ZHANG H P, et al. A new type of spline interpolation method with its application in the tunneling process of tunnel boring machine [J]. 2nd International Conference on Applied Mathematics, Modelling, and Intelligent Computing (CAMMIC 2022), Part Two of Two Parts, 2022: 1225945.
- [17] 闫丽梅,付春耕,徐建军,等. 基于改进插值 HHT 算法的输电线路行波故障测距[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9):1-6.
YAN L M, FU CH G, XU J J, et al. Traveling wave fault location of transmission lines based on improved interpolation HHT algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(9):1-6.
- [18] 张娟,张磊,程文华,等. 一种高灵敏度声表面波振动传感器的设计研究[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10):100-111.
ZHANG J, ZHANG L, CHENG W H, et al. Design and research of a high-sensitivity surface acoustic wave vibration sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10):100-111.
- [19] 黄代鑫,杨志鹏,焦思程,等. 基于遗传算法的激光位移传感器小型化结构设计[J]. 光学技术, 2024, 50(4):385-390.
HUANG D X, YANG ZH P, JIAO S CH, et al. Miniaturized structural design of laser displacement sensor based on genetic algorithm [J]. Optical Technique, 2024, 50(4):385-390.
- [20] 柯银鸿. LVDT 位移传感器可靠性设计研究[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(7):41-43.
KE Y H. Reliability design research of LVDT displacement sensor [J]. Paper Equipment and Materials, 2024, 53(7): 41-43.

作者简介



强彦(通信作者), 2004 年于辽宁石油化工大学获得学士学位, 2007 年于西安交通大学获得硕士学位, 2024 年于东南大学获得博士学位, 现为兰州理工大学副教授。主要研究方向为流体测量控制技术和生物流体机械工程。

E-mail: 20070046@lut.edu.cn

Qiang Yan (Corresponding author) received her B.Sc. degree in 2004 from Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, received her M.Sc. degree in 2007 from Xi'an Jiaotong University, received her Ph.D. degree in 2024 from Southeast University. Now she is an associate professor at the School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology. Her main research interests include fluid measurement and control technology, as well as biofluid mechanical engineering.