

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.02.10

高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统

刘国庆¹, 宋玉环², 江嘉琪², 张子强², 徐金田³, 徐淼淼^{2*}

(1. 中天智能装备有限公司, 江苏 南通 226010; 2. 南通大学 信息科学技术学院, 江苏 南通 226019;

3. 江苏中天科技股份有限公司, 江苏 南通 226400)

摘要: 为解决电缆传统接触式传感器精度低、可靠性差等问题, 运用电磁感应原理, 采用差动互感测量技术, 通过发射电路和接收电路的协同工作, 研制了一种高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统, 实现电缆线芯位置的高精度检测。发射电路通过增强 85 kHz 的正弦信号驱动发射线圈, 接收电路将接收到的信号转换为 ± 5 V 的直流电压信号和 4 ~ 20 mA 电流信号。为了有效抑制主要集中在接收线圈及其传输路径上的辐射干扰, 采用了屏蔽传输线与带通滤波器相结合的方式减小噪声影响。实验结果表明: 在 ± 30 mm 位移范围内的传感器线性度和灵敏度性能最佳, 线性度高达 97.49%, 灵敏度达到 35.93 mV/mm。该系统显著提高了高压电缆的位移检测精度, 克服了传统检测方法的局限性, 展现出良好的稳定性和可靠性。

关键词: 传感器设计; 非接触位移检测; 差动互感技术; 抗干扰; 静态标定

中图分类号: TP212.9; TB92

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 02-0095-09

High-voltage cable suspension differential mutual inductance non-contact displacement detection system

LIU Guoqing¹, SONG Yuhuan², JIANG Jiaqi², ZHANG Ziqiang², XU Jintian³, XU Miaomiao^{2*}

(1. Zhongtian Smart Equipment Co., Ltd., Nantong 226010, China; 2. School of Information Science and Technology,

Nantong University, Nantong 226019, China; 3. Jiangsu Zhongtian Technology Co., Ltd., Nantong 226400, China)

Abstract: To solve the problems of low precision and poor reliability of traditional contact sensors in the detection of high-voltage cable suspension, a non-contact displacement detection system of high-voltage cable suspension differential mutual inductance is developed by applying the principle of electromagnetic induction and adopting the differential mutual inductance measurement technology through the coordinated work of the transmitting circuit and receiving circuit, which realizes the high-precision detection of the position of the cable core. The transmitting circuit drives the transmitting coil by enhancing the 85 kHz sinusoidal signal, and the receiving circuit converts the received signal into ± 5 V direct voltage signal and 4 ~ 20 mA current signal. To effectively suppress the radiated interference, which is mainly concentrated in the receiving coil and its transmission path, a combination of shielded transmission line and band-pass filter is used to minimize the noise effect. The experimental results show that the best performance of sensor linearity and sensitivity is achieved in the displacement range of ± 30 mm, with linearity up to 97.49% and sensitivity up to 35.93 mV/mm.

收稿日期: 2024-11-29; 修回日期: 2025-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(62101287)

引用格式: 刘国庆, 宋玉环, 江嘉琪, 等. 高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 95-103.

Citation: LIU G Q, SONG Y H, JIANG J Q, et al. High-voltage cable suspension differential mutual inductance non-contact displacement detection system[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 95-103.



This system significantly improves the detection accuracy of high-voltage cables, overcomes the limitations of the traditional detection methods, and demonstrates good stability and reliability.

Key words: sensor design; non-contact displacement detection; differential mutual inductance technology; anti-interference; static calibration

0 引言

随着现代高压电缆生产技术的不断发展,确保生产过程中的线芯稳定性已成为电缆制造中的关键任务。传统的电缆位移检测方法通常依赖于接触式传感器,如电阻应变计^[1]、位移传感器^[2]等,这些方法在实际应用中可能受到电缆外部环境、安装空间和电磁干扰等多方面因素的制约,且通常存在一定的接触磨损和电气噪声问题,降低了检测精度和可靠性。线性位移传感器按原理可分为电阻式、电容式、电感式、电涡流式4种类型。电感式位移传感器一般可以分为自感式和互感式^[3]2种类型,其基本原理是测量线圈电感变化量来间接测量被测物体的距离变化,多采用差动连接^[4],从而提高传感器的灵敏度和线性度。

近年来,非接触式位移检测技术逐渐成为电缆检测领域的研究热点,尤其是差动互感式非接触位移检测技术。其利用电磁感应原理,通过发射线圈和接收线圈之间的磁场变化来检测电缆的位移变化,这种方法能够有效避免接触式传感器可能引起的电气干扰和磨损问题。文献[5]阐述了差动变压器式电感位移传感器的工作原理,利用电磁感应原理将被测位移量转换为线圈间互感的变化来工作。文献[6]设计了一种圆盘形非接触式电压传感器,通过调整球型传感器极板面积,使其能够完整测量竖直方向上的电场信号。文献[7]研究了自感式位移传感器铁芯材料和磁导率对精度的影响,并建立了传感器线圈阻抗与磁导率的数学模型,适用于互感式传感器设计。

目前,国内外普遍采用基于电磁感应的悬垂控制方式,即通过导体切割磁感线原理完成导体位置检测^[8]。文献[9]设计了一种基于互感原理的非接触式位移检测装置,通过差动变压器将位移转换为电压输出,并使用整流、滤波和信号放大模块进行处理,最终由单片机显示位移。文献

[10]提出了一种基于电流源电平转换技术实现低压栅极驱动放大器的简单方案。然而,这些方法在实际应用中仍存在一些局限性和挑战,包括系统灵敏度的不足、环境噪声的影响以及复杂环境下的线芯定位和位移测量^[11]精度等问题。

为了解决以上问题,研制了一种新型的高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统。互感式位移传感器具有价格低廉、灵敏度高、抗干扰能力强等优点^[12],而且通过优化发射信号的频率、幅度以及发射线圈的参数,最大化磁感变化率,并通过精确调整接收线圈的参数,进一步提高位移测试系统的灵敏度。

1 测试原理

高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统利用非接触式测量方法,可实现对线芯位置的精确检测。该系统主要由线芯、发射电路、发射线圈、接收线圈、接收电路构成,其中,接收线圈共2组,呈对称分布,如图1所示。

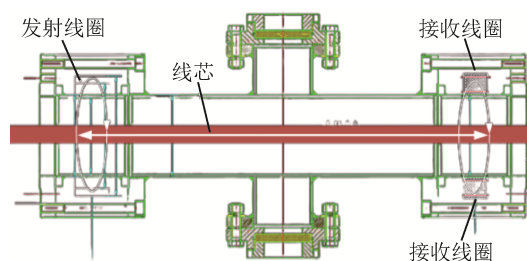


图1 测试系统工作原理

Fig.1 Test system working principle

发射线圈总阻抗由电阻 R_0 和电感 L_0 决定,二者串联构成等效阻抗 Z ,即

$$Z = R_0 + j\omega L_0 \quad (1)$$

式中: R_0 为发射线圈的损耗电阻, L_0 为发射线圈的自感, ω 为激励电压的角频率, j 为虚数单位,表示阻抗中的虚部。

由发射电路给发射线圈1个正弦交流输入信号

U_0 , 此时流过发射线圈的交流电流 I_0 为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_0 + j\omega L_0} \quad (2)$$

由于发射线圈与接收线圈距离较远, 发射线圈产生的交变磁场不会直接被接收线圈吸收, 而是在线芯内部产生交变的感生电动势, 从而产生交变电流 I_0' 。线芯在管道内部上下移动, 线芯感生电动势产生的交变磁场与上下对称的接收线圈形成差动互感式位移传感器, 2个接收线圈产生感生电动势 E_{21} 、 E_{22} , 其表达式为

$$E_{21} = -j\omega M_1 I_0' \quad (3)$$

$$E_{22} = -j\omega M_2 I_0' \quad (4)$$

式中: M_1 、 M_2 分别为线芯与2个接收线圈的互感系数。

2个接收线圈反相串联, 构成差动互感位移传感器。其输出电压 V_p 是2个感应电动势的差值, 即

$$V_p = E_{21} - E_{22} \quad (5)$$

将式(3)与式(4)代入式(5)后得到

$$V_p = -j\omega I_0' (M_1 - M_2) \quad (6)$$

这说明, V_p 与互感差 $M_1 - M_2$ 成比例关系。根据互感的定义, 互感 M 可以表示为磁通量 Φ 与电流 I_0' 的比值, 因此将其代入到输出电压表达式(6), 即可得到

$$V_p = -j\omega (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (7)$$

而线芯的位移 x 会改变磁通量 Φ 。当线芯上下移动时, 2个接收线圈的磁通量发生变化, 因此输出电压与磁通量 Φ 的变化率相关。在忽略铁损、磁阻和线圈分布电容的理想条件下, 其等效电路可以表示为

$$V_p = 4\pi f N \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (8)$$

式中: f 为激磁电流的频率, N 为2个接收线圈的匝数。

在理想条件下, 当线芯处于初始平衡位置时, 2个互感系数相等, 即 $M_1 = M_2$, 此时差动线圈输出电压 $V_p = 0$ V。

当线芯由零点向上移动时, 由于磁阻的影响, 磁通 Φ_1 将大于 Φ_2 , 使 $M_1 > M_2$, E_{21} 增大、 E_{22} 减小, $V_p > 0$; 反之, E_{21} 减小、 E_{22} 增大, $V_p < 0$ 。因此, 当 M_1 和 M_2 随着线芯位移 x 变化时, 输出电压 V_p 也将随之变化。

2 测试系统组成

基于上述原理分析, 设计了差动互感式非接触位移校准系统来测试高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统的性能。该测试系统主要由发射线圈、接收线圈、线芯、硬件电路、直线位移校准平台等组成, 如图2所示。

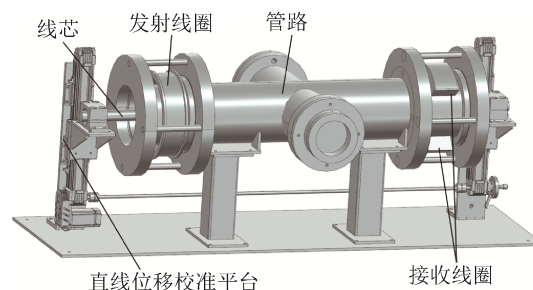


图2 差动互感式非接触位移校准系统

Fig.2 Differential mutual inductance non-contact displacement detection system

2.1 系统硬件组成

发射线圈采用环形设计, 通常由多匝铜线绕制而成, 安装于管道外侧。当其通入正弦交流电压时, 环形线圈能够产生均匀的磁场, 电磁波因其传播特性能够有效穿透管道并感应到线芯位置的变化。

接收线圈是由2个上下对称的弧形线圈组成, 安装于管道外侧, 主要用于接收由线芯移动产生的磁场变化, 弧形线圈在接收电磁波时能够提供较为稳定的磁感应, 并通过信号的幅度变化来感知管道内线芯的位置变化。发射线圈和接收线圈骨架的具体参数如表1所示。

表1 发射线圈和接收线圈参数

Tab.1 Parameters of the transmitting coil and receiving coil

线圈类型	形状	外径 / mm	内径 / mm	宽度 / mm	匝数 N
发射线圈	环形	320	280	90	103
接收线圈	弧形	330	220	65	27

高压电缆的线芯主要由铜材料制成, 线芯内径为31 mm。发射线圈产生的交变磁场会使线芯内部产生交变的感生电动势, 当电缆线芯的上下位

置发生变化时,线芯与2个接收线圈的互感发生变化,导致2个接收线圈感应到差动的感生电动势。

电缆的外侧包裹着一个内径为203 mm的密封硫化管路,管路是悬垂生产线的主体装置,线芯在管路内部进行化学反应,满足不同厚度的绝缘材料的包覆。

2.2 高精度信号处理电路

电路硬件部分主要由发射电路和接收电路组成,如图3所示。发射电路主要由供电电源、信号发生电路、电压跟随电路和信号放大电路组成。其中,供电电源提供 $\pm 15\text{ V}$ 的直流电压信号,信号发生电路用于产生85 kHz的正弦信号,正弦信号经过电压跟随电路后,调整输入输出阻抗以确保信号匹配;最后,信号放大电路利用电感-电容(Inductor-Capacitor, LC)串联谐振原理,提升发射线圈两端正弦信号的峰峰值,从而增强磁场的强度。

接收电路主要包括供电电源、有源带通滤波器

器^[13]、均方根直流转换器、差分放大电路^[14]和电压电流转换电路。其中,供电电源提供 $\pm 15\text{ V}$ 的直流电压信号,有源带通滤波器通频带为48.20~96.50 kHz,并将信号放大2倍。为消除零点残余电压对传感器性能的影响,采用均方根直流转换器将接收线圈的交流信号转换为直流信号;差分放大电路将一对转换后的直流信号进行差分放大,输出 $\pm 5\text{ V}$ 的直流电压信号;最后,通过电压电流转换电路将电压信号转换为4~20 mA的电流信号,电压信号用于位移显示,电流信号用于上下牵引机的比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制。

2.3 直线位移校准平台

系统通过实时反馈位移信号给悬垂控制器,进而调节上下牵引机的张力,以确保线芯能够稳定运行,避免因过度拉伸或松弛而造成磨损或损坏。为了实现这一目标,系统需要模拟不同的电缆悬垂状态,并通过精确控制线芯在管道中的运动来模拟不同工况下线芯的位置变化。

为得到传感器电压-位移线性关系,设计了一套直线位移校准平台,用于调整线芯的上下位移,其重复定位精度为 $\pm 0.05\text{ mm}$,有效行程为800 mm。

3 系统抗干扰性能设计

为了优化悬垂位移检测系统的抗干扰性能,需要分析系统可能受到的主要干扰类型。干扰集中在接收线圈和信号传输路径,主要以电磁辐射的形式进行传导,同时噪声表现为加性噪声。针对这些干扰,本系统设计了屏蔽传输线和带通滤波器以削弱干扰,提升系统的信号稳定性和准确性。

3.1 高效电磁干扰屏蔽线传输设计

针对接收线圈信号传输过程中可能受到的电磁辐射干扰,采用铜芯聚氯乙炔绝缘聚氯乙炔护套屏蔽软电缆(Copper Core PVC Insulated PVC Sheathed Shielded Flexible Cable, RVVP)来连接接收线圈与接收电路印制电路板(Printed Circuit Board, PCB)。屏蔽线是一种用于防止电磁干扰的特殊电缆,其结构由1根导线和包裹在外部的金属网组成。金属网通常需要接地或连接到直流电源的等

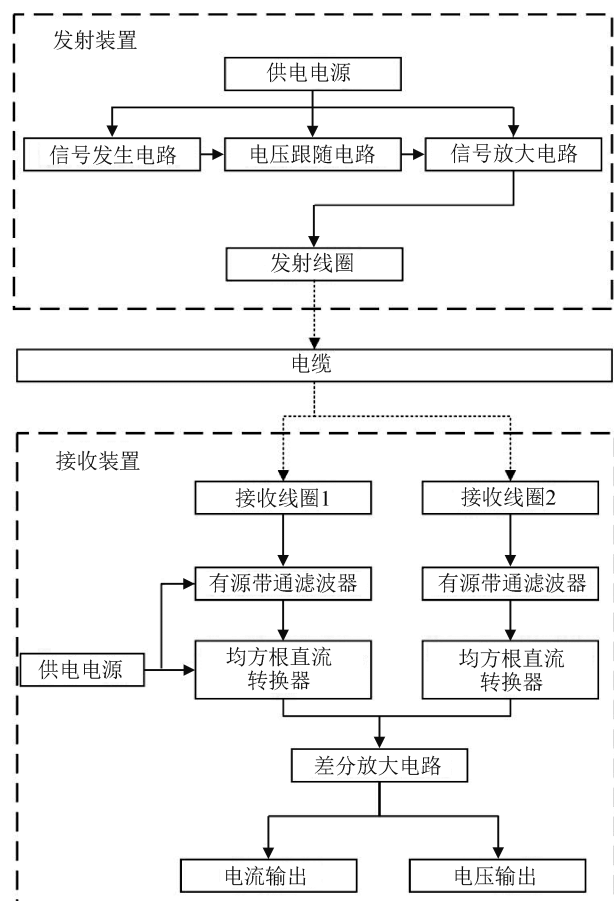


图3 电路原理框图

Fig.3 Circuit schematic block diagram

电势点上,通过这种方式,金属网形成一个闭合的电磁屏障,将电磁波隔离在外部,从而防止信号传输过程中的噪声或干扰进入信号线,保证信号的稳定性和准确性。

实验结果显示:使用RVVP屏蔽线后,接收线圈信号的抗干扰能力显著提升。使用屏蔽线前后的波形对比如图4所示。与图4(a)未使用屏蔽线输出的波形相比,图4(b)使用屏蔽线后输出的波形呈现出明显较少的杂波现象,这说明使用屏蔽线有效减少了外部电磁干扰对信号的影响,使得波形更加光滑,噪声水平显著降低。

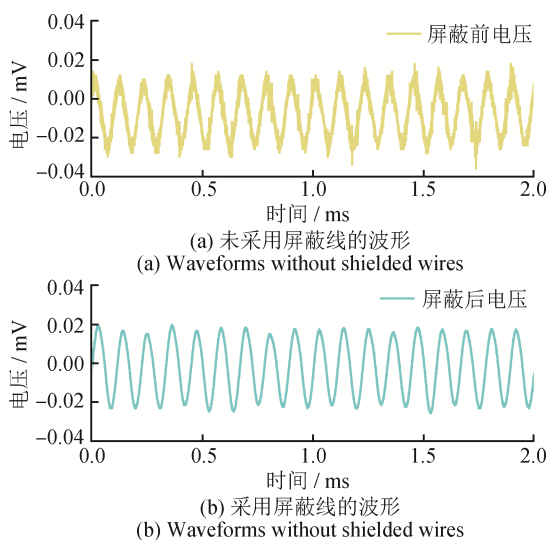


图4 使用屏蔽线前后波形对比
Fig.4 Comparison of waveforms before and after using shielded wire

3.2 自适应有源带通滤波器

为进一步削弱信号路径中的噪声干扰,本系统在电路中加入带通滤波器,用于选择目标频率范围内的信号并抑制其他频率的噪声。电阻电容(Resistor-Capacitor, RC)滤波器^[15]通过电阻和电容的组合实现频率选择性滤波,具有结构简单、易于实现的优点。调换 R 和 C 的位置即可实现高通和低通滤波器,两者的截止频率 f_c 的计算公式相同,如式(9)所示。

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (9)$$

式中: R 为电阻阻值, C 为电容值。

对于RC滤波器而言,在截止频率点其衰减为

-3 dB,约为原信号的70%。一个高通和一个低通RC无源滤波器可构成一个RC带通滤波器,它被视为二阶滤波器,然而随着RC滤波器的阶数增加,其输出阻抗的劣势表现为输出阻抗增大。这是因为更高阶的无源RC滤波器通常包含更多的电阻和电容组件,尤其是串联结构下,电阻的累积会导致整体输出阻抗变高,这种增大的输出阻抗会导致信号衰减以及驱动能力减弱,对后级电路影响较大。

为了使滤波器拥有较低的输出阻抗,本系统采用有源RC带通滤波器,使用运算放大器改变其输入输出阻抗的同时将信号放大。图5所示为设计的有源RC带通滤波器电路,图6所示为仿真结果。其中,高通滤波器截止频率为48.20 kHz,低通滤波器截止频率为96.50 kHz。

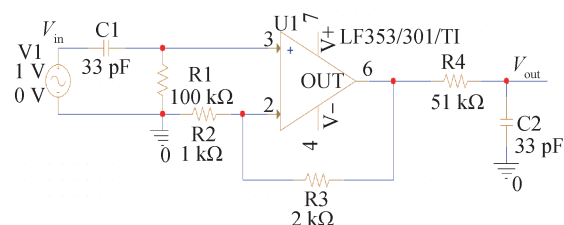


图5 滤波电路原理图

Fig.5 Schematic diagram of filtering circuit

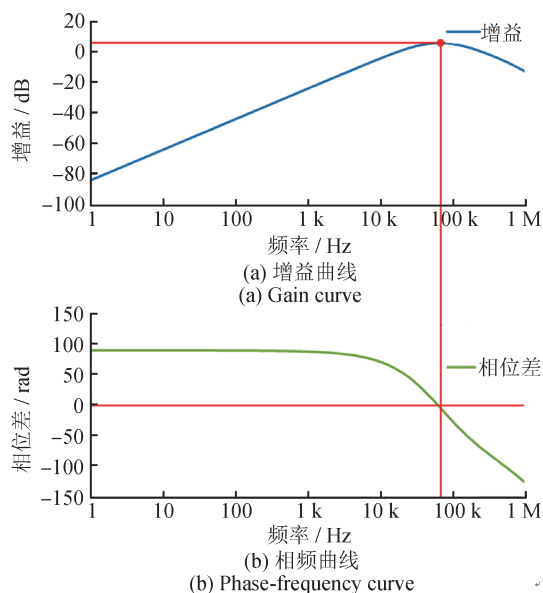


图6 滤波器仿真结果

Fig.6 The result of filter simulation

由图6得出滤波器的最高增益出现在67.60 kHz的频率点处,在该点处滤波器的增益达到5.64 dB

(即放大倍率为1.92), 信号经过滤波器处理后得到了有效放大。此外, 在67.60 kHz附近, 滤波器的增益表现出一个明显的峰值, 意味着滤波器在该频率上具有良好的传输特性, 能够有效地通过此频段的信号, 且对其他频率的抑制较强。在实验室环境中, 对滤波器的性能进行了详细的验证, 如图7所示。

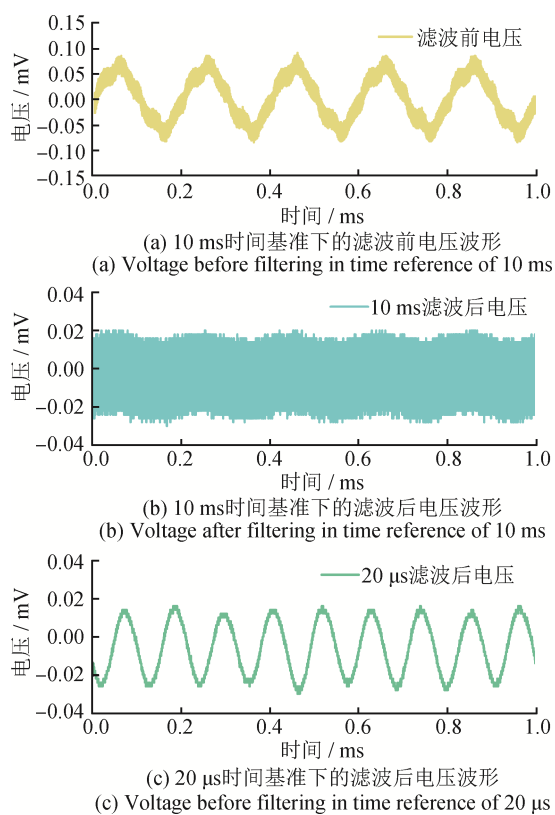


图7 不同时间基准下的滤波器输出波形

Fig.7 Filter output waveforms in different time bases

发射线圈提供了85 kHz的交变磁场, 利用示波器捕捉接收线圈原始波形, 图7(a)为10 ms的时间基准下的滤波前电压, 可以发现在接收信号上叠加了50 Hz的工频干扰和较大的高斯白噪声。这些干扰使得波形不稳定、振幅波动较大, 在低频部分, 50 Hz的工频干扰导致波形的质量明显下降; 而在高频部分, 高斯白噪声使得信号的波形更加模糊不清。

在信号进入有源RC带通滤波器后, 在10 ms的同一时间基准下观察滤波后的输出波形, 如图7(b)所示, 可以清楚地观察到滤波后50 Hz的工频干扰得到有效剔除, 减少了信号中不必要的周期

性波动。图7(c)为示波器20 μs时间基准下的滤波器实测滤波效果, 滤波器通过滤除高频高斯白噪声, 使信号更加平滑。由此可见, 有源RC带通滤波器能够有效滤除低频和高频干扰, 提高系统的抗干扰能力。

4 实验结果验证

高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统搭建完成后, 通过调节电机位移来模拟高压电缆悬垂的不同状态, 如图8所示。

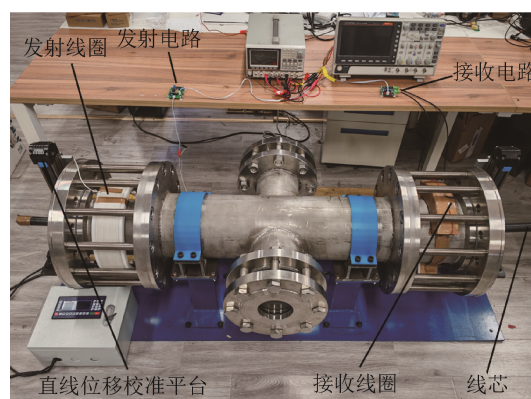


图8 系统实物图

Fig.8 Actual photo of the system

实验中, 发射线圈和接收线圈的匝数分别为103匝和27匝, 在滤波器通频带范围内, 选取85 kHz作为发射信号频率, 此时发射线圈两端的电压峰峰值为64.80 V的交流电压。通过直线位移校准平台调节线芯的位置, 在不同位移范围内, 对传感器进行多次静态校准, 并对数据进行线性拟合, 得到电压信号与位移之间的线性关系, 如图9所示。

利用线性度和灵敏度计算公式, 计算可得悬垂位移检测系统性能参数, 见表2。

由图9可以看出, 系统在不同位移范围内的表现有着明显差异。首先, 从非线性的角度来看, 系统在±30 mm范围内有较低的非线性误差, 为2.51%, 这表明电压峰峰值与位移之间的关系保持高度线性。随着位移范围的增大, 在±50 mm、±80 mm范围内, 非线性误差分别增至7.15%和6.95%。这一变化表明: 随着位移增大, 系统的响应逐渐偏离理想线性, 然而, 系统的整体线性度

仍保持在 92.85% 以上, 这说明系统在整个测量范围内依然保持较好的线性特性, 误差较小、稳定性相对较高。

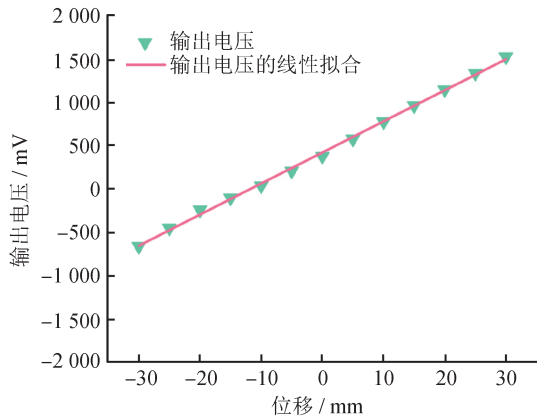
在灵敏度方面, 系统在不同位移范围内的灵敏度值也有所不同。对于 ± 30 mm 的位移范围, 系

统的灵敏度达到 35.93 mV/mm, 这是 3 个测试范围中最高的, 表明系统在该范围内对位移变化的响应最为敏感, 能够提供更精确的电压变化量。

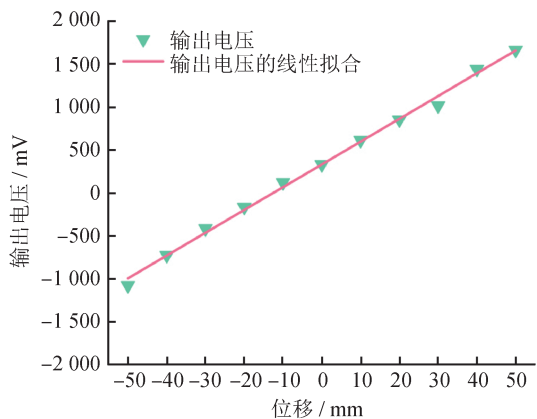
从整体上看, 在频率为 85 kHz 时, 系统在 ± 30 mm 范围内的静态性能最优, 表现出最高的灵敏度和最低的非线性误差。

表 2 悬垂位移检测系统标定结果
Tab.2 Results of suspension displacement monitoring system

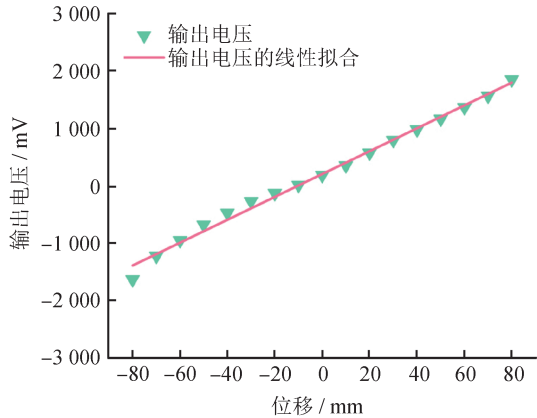
位移/mm	拟合曲线	非线性/%	灵敏度/(mV/mm)
± 30	$u_0 = 35.93x + 425$	± 2.51	35.93
± 50	$u_1 = 26.58x + 330$	± 7.15	26.58
± 80	$u_2 = 20.01x + 209$	± 6.95	20.01



(a) ± 30 mm 内的位移-电压曲线
(a) - Voltage curve within ± 30 mm displacement



(b) ± 50 mm 内的位移-电压曲线
(b) Voltage curve within ± 50 mm displacement



(c) ± 80 mm 内的位移-电压曲线
(c) Voltage curve within ± 80 mm displacement

图 9 悬垂位移检测系统标定结果图

Fig.9 Calibration results of suspension displacement monitoring system

为了验证系统在 ± 30 mm 范围内的动态性能, 通过直线位移校准平台调节线芯在 ± 30 mm 范围内上下运动, 利用示波器测得输出电压随时间的变化曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可以观察到, 在 ± 30 mm 的测量量程内, 波形在 4 个完整的上升和下降周期中呈现出良好的对称性, 且经过有源带通滤波器处理后, 明显改善高频噪声干扰。然而, 在上下移动过程中, 曲线有轻微的抖动现象, 经分析发现: 这种抖动主要出现在线芯加速度突变的瞬间, 主要由重力加速度与惯性作用引起的不稳定晃动导致, 这种晃动使得电压测量数据轻微抖动。

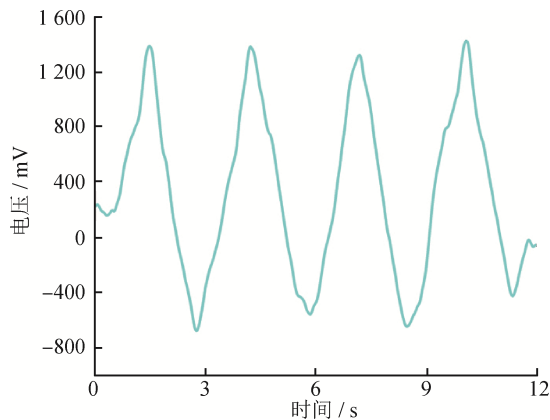


图 10 ± 30 mm 内的动态电压输出波形

Fig.10 Dynamic voltage output waveform within ± 30 mm

5 结论

高压电缆悬垂差动互感式非接触位移检测系统通过非接触式测量方法, 实现对线芯位移的高精度测量, 通过接收线圈采集信号, 并输出相应的模拟电压信号。此外, 该系统还考虑了工业现场的干扰问题, 通过有源带通滤波器有效消除了低频干扰和高频噪声的影响, 有效地提高了系统的抗干扰能力。

在不同位移条件下, 测试结果表明: 系统能够有效地测量位移的微小变化, 电压值与位移之间呈现出明显的线性关系, 在 ± 30 mm的位移范围, 系统的灵敏度达到 35.93 mV/mm , 非线性误差为 2.51% 。通过对比实际位移和检测输出信号, 验证了系统的精度和可靠性。该系统的设计和实现, 不仅提高了电缆生产过程中的位移控制精度和稳定性, 而且对于提升电缆制造行业的技术水平具有重要的实际意义。

参考文献

- [1] 张知博, 王勇杰, 杨庆浩. 电阻应变传感器应用进展[J]. 化工新型材料, 2025, 53(2): 34-39.
ZHANG Z B, WANG Y J, YANG Q H. Application progress of resistance strain sensor[J]. New Chemical Materials, 2025, 53(2): 34-39. (in Chinese)
- [2] 余菲, 孙楠, 朱廷伟, 等. 差动变压器式位移传感器性能稳定性技术研究[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(6): 565-571.
YU F, SUN N, ZHU T W, et al. Study on performance stability technology of linear variable differential transformer[J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(6): 565-571. (in Chinese)
- [3] CHEN B, TAO X, WAN N N, et al. Design method for high-power high-frequency magnetic-resonance air-core transformer[J]. COMPEL - the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2023, 42(3): 740-756.
- [4] 胡晓强, 窦峰山, 彭增德, 等. 一种新型高精度互感式位移传感器[J]. 轴承, 2024(7): 45-51.
HU X Q, DOU F S, PENG Z D, et al. A new high-precision mutual inductance displacement sensor[J]. Bearing, 2024(7): 45-51. (in Chinese)
- [5] 王大朋, 宋春丽. 磁轴承用电感式位移传感器的研究[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(7): 28-30.
WANG D P, SONG C L. Study on inductive displacement sensor for magnetic bearing[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(7): 28-30. (in Chinese)
- [6] 李远, 李孟阳, 杨家全, 等. 圆盘形结构的非接触式电压传感器设计与实验[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 96-103.
LI Y, LI M Y, YANG J Q, et al. Design and experiment of non-contact voltage sensor with disc-shaped structure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 96-103. (in Chinese)
- [7] REN Z Q, LI H W, CHEN X W, et al. Impedance modeling of self-inductive displacement sensor considering iron core reluctance and flux leakage[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(9): 8583-8595.
- [8] 张克兆, 史宏俊, 丁园园, 等. 基于自抗扰控制的交联电缆悬垂控制系统[J]. 电子测量技术, 2022, 45(19): 56-63.
ZHANG K Z, SHI H J, DING Y Y, et al. Suspension control system for XLPE cables based on active disturbance rejection controller[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(19): 56-63. (in Chinese)
- [9] 刘炳言, 李筱雅, 李莹, 等. 利用互感原理设计非接触式位移监测装置的实验研究[J]. 物理与工程, 2018, 28(1): 114-118.
LIU B Y, LI X Y, LI Y, et al. Experimental research on the design of a non-contacted displacement monitoring in application of the mutual inductance principle[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(1): 114-118. (in Chinese)
- [10] RENTERIA P M, RAMIREZ A J, DIAZ S A. Simple scheme for the implementation of low voltage fully differential amplifiers without output common-mode feedback network[J]. Journal of Low Power Electronics and Applications, 2020, 10(4): 34.
- [11] CAO Z, HUANG Y K, PENG F, et al. Driver circuit design for a new eddy current sensor in displacement measurement of active magnetic bearing systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(17): 16945-16951.
- [12] 秦毅, 王阳阳, 彭东林, 等. 电感式角位移传感器技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 1-14.
QIN Y, WANG Y Y, PENG D L, et al. Inductive angular

- displacement sensors technologies: a review[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 1-14. (in Chinese)
- [13] 刘宝衡, 付天晖, 王永斌. 一种超低频高阶带通滤波器设计与仿真[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(11): 1135-1139.
- LIU B H, FU T H, WANG Y B. Design and simulation of an ultra-low frequency high-order bandpass Filter [J]. Electronic Components and Materials, 2021, 40(11): 1135-1139. (in Chinese)
- [14] 李文彬, 王圣捷, 朱平杰, 等. 多分立电流源低噪声 JFET 差分放大技术研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(1): 134-141.
- LI W B, WANG S J, ZHU P J, et al. Research on differential amplification technology of multi-discrete current source low noise JFET[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(1): 134-141. (in Chinese)
- [15] EL GHALY A, TARNINI M, CHAHINE K. A robust reference extraction method for shunt active power filters in the presence of noise and source voltage distortion [J].

Measurement, 2025, 242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116243>.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者:刘国庆(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为智能化装备系统研发。



通信作者:徐森(1991—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为空间信息获取与处理、新型传感器设计与开发。