

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514029

基于等电位屏蔽的抗雨水干扰浮地电压传感器*

张文斌¹, 赵宏瑞¹, 谭向宇², 王前超¹, 蒋天意¹

(1. 昆明理工大学机电工程学院 昆明 650504; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院 昆明 650217)

摘要:使用浮地式电压传感器对配网输电线路电压进行测量,相较于传统的电压互感器,大幅节约了成本和体积。然而,其耦合电容分压的原理使得测量结果易受环境干扰,尤其是在雨水环境下传感器工频测量结果会出现快速且显著的波动,容易和电网的真实故障发生混淆,给配网运行监测带来困扰。针对该问题,首先结合传感器的分压模型,通过理论分析和仿真,明确了传感器待测电场在雨水环境下发生的严重畸变,以及传感器上下两极板对地耦合电容受到的干扰是导致传感器出现测量误差的主要原因。其次,通过对分压模型和传感器传递函数的分析,设计了一种新型的等电位屏蔽壳与位移电流跨阻放大的电压传感器,利用等电位屏蔽壳降低外部环境突变对耦合电容的影响,并通过跨阻放大电路和位移电流信号的处理,提升抗干扰能力。最后,搭建了包括可调节的模拟淋雨装置、标准正弦波电压源以及数据采集系统的实验平台,对新型传感器进行了实验,以验证传感器设计方案的合理性。实验采用工频 5.77 kV 的标准电压输入,通过不同降雨量和模拟淋雨位置的对比实验,验证了新型传感器可以有效抑制雨水的干扰,测量结果波动降低了 50% 以上,且传感器具有较好的测量精度、稳定性和线性度,对工频 5.77 kV 电压幅值的测量误差在 3.3% 以内。

关键词: 浮地式电压传感器; 雨水干扰; 等电位屏蔽; 位移电流式电压测量

中图分类号: TM933.13 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Floating-ground voltage sensor resistant to rainwater interference based on equipotential shielding

Zhang Wenbin¹, Zhao Hongrui¹, Tan Xiangyu², Wang Qianchao¹, Jiang Tianyi¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Electric Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Using floating-ground voltage sensors to measure the voltage of distribution network transmission lines greatly reduces cost and size compared with traditional voltage transformers. However, their capacitive voltage division principle makes measurement results susceptible to environmental interference, especially in rainy conditions. The power frequency measurement results of the sensor show rapid and significant fluctuations, which are easily confused with actual grid faults and pose challenges for distribution network operation monitoring. To address this issue, based on the sensor's voltage division model and via theoretical analysis and simulation, this paper firstly identifies that severe distortion of the sensor's measured electric field in rainy conditions and interference to the ground-coupled capacitance of the sensor's upper and lower plates are the main causes of the sensor's measurement errors. Secondly, through analyzing the voltage division model and sensor transfer function, it designs a new-type voltage sensor with an equipotential shielding case and displacement current transimpedance amplification is designed. The equipotential shielding case reduces the impact of sudden external environmental changes on coupled capacitance, while the transimpedance amplification circuit and displacement current signal processing enhance anti-interference capability. Finally, an experimental platform is established, including an adjustable simulated rain device, a standard sine-wave voltage source, and a data acquisition system to test the new sensor and verify the rationality of its design scheme. Using standard 5.77 kV power frequency input voltage, comparative experiments under different rainfall intensities and simulated rain positions validate that the new sensor can effectively suppress rain interference, with measurement fluctuations reduced by over 50%. It

收稿日期: 2025-05-12 Received Date: 2025-05-12

* 基金项目: 云南省科技厅科技计划(202301AS070028)项目资助

also has good measurement accuracy, stability, and linearity, with the measurement error of the 5.77 kV power frequency voltage amplitude within 3.3%.

Keywords: floating voltage sensor; rainwater environment interference; equipotential shield; displacement current voltage measurement

0 引言

如今分布式电源在电网系统中大量接入,配电网特性愈发复杂,电力系统对配电网的实时同步检测提出了更高的要求^[1-2]。而传统的电磁式电压互感器和电容式分压器,由于其安装困难,制造成本高等问题,无法用于配电网大范围的多点监测^[3-5]。亟需一种低成本、小体积的电压传感器,随着电子技术逐渐成熟,通过检测待测导体周围电场以获得电压的电子式电压传感器被提出^[6-7],其测量精度相对较低,但是也能够满足对配电网计量和保护的要求,同时拥有较小的体积,减少了制造成本,更易安装,使得配电网的大范围实时监测成为可能。用于配电网绝缘导线的电子式电压传感器根据原理不同主要分为两类,其一是根据不同材料在电场中表现出的光电效应等物理特性间接获得电场强度,进而反算电压^[8],其二是直接耦合导体周围电场以获取电压信号^[9-11]。在这之中根据耦合电容分压原理进行探头设计的方法已经较为成熟,已经较为广泛的运用于家用输电线路的电能计量^[12],气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的快速暂态过电压测量^[13],变电站现场的雷电过电压和放电检测^[14-15]等领域。

然而目前这类传感器,为了减小周围环境对测量结果的干扰,普遍对稳定的接地节点有一定的需求,例如被广泛运用于超高压和特高压电网的电压测量中的电容式电压互感器(capacitive voltage transformer, CVT),其接触式且进行接地屏蔽的测量方法^[16-17],几乎不受雨水等环境因素的干扰,但是体积较大,对绝缘性能要求高,难以在配电网大范围多点安装。在非接触电压传感器的领域中,相关研究也会采取接地的方式减小环境带来的测量误差,文献[18]设计了一种使用接地屏蔽的传感器,文献[19]在接地屏蔽之下,并通过阻抗变换,构建方程求解传感器中的未知耦合电容;然而接地的屏蔽方法难以运用于配电网架空导线的电压测量。不使用接地方法屏蔽外界干扰的浮地式电压传感器,虽然拥有良好的部署灵活性,但是由于屏蔽结构的缺失,部分研究常在较为理想的环境下对其性能进行分析和优化^[20]。

在浮地式电压传感器的实际运用和实验中发现,未使用屏蔽结构的电压传感器在雨水环境中会出现显著的测量波动,这种波动表现为工频电压幅值的变化,最大幅值波动可达到68.5%,易与电网中的真实电压波动发生混淆;此外,传感器的自校准方法往往被运用于环境缓慢

变化引起的耦合电容漂移^[19],针对雨水引起的快速测量波动的问题难以适用。除自校准方法外,为了解决浮地式电压传感器易受周围环境干扰的问题,文献[21]提出了一种等电位屏蔽法,该方案采用了抑制耦合电容漂移的方式以提高传感器测量的稳定性,目前该方案常被运用于降低周围其他临近建筑物干扰^[22]、减少对地杂散电容干扰^[23]和三相输电线路中屏蔽相间干扰^[24]等问题上,相关研究还未将其运用在减少气候干扰的领域中,特别是雨水对电压传感器干扰的原因,以及抗雨水干扰的传感器的设计和优化研究内容还较少。

因此,本研究提出了一种基于等电位屏蔽的新型电压传感器,其应用场景主要是10 kV配电网的电压测量。

1 雨水干扰模型与原理分析

首先为了更好的对雨水干扰的成因进行分析,构建了传感器的耦合电容分压模型如图1所示。

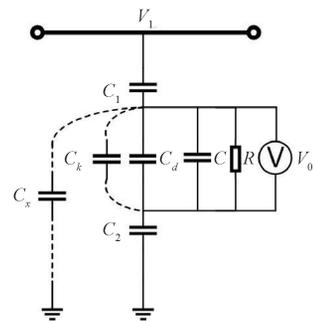


图1 雨水中电压传感器示意图

Fig. 1 Diagram of voltage sensor in rainwater

电容 C_1 、 C_2 、 C_d 为传感器的主分压电容,其中 C_1 、 C_2 分别为上下极板的耦合电容, C_d 为上下极板间的结构电容,电容 C_x 为传感器测量极板对地的泄露电容。此外,当传感器两极板间出现电场畸变时会导致上下极板间的电势差突变,在电路模型中将其体现为电容 C_k 的突变。在稳定的测量环境下,这些电容的数值都相对稳定,且电容 C_x 和 C_k 的数值远小于其他电容,此时流过传感器测量电阻的电流为:

$$I = \frac{V_1}{1/j\omega C_1 + 1/j\omega C_2 + R/(1 + j\omega(C + C_d)R)} \quad (1)$$

在传感器的电路设计中,为了获得良好的分压比,同时减小寄生电容的干扰,常在结构电容 C_d 两端并联一个电容 C 和电阻 R ^[25],使得测量分压电容(C_d+C)与电阻 R

并联后的阻抗远小于集总电容 C_1 和 C_2 的阻抗,此时电流计算公式为:

$$I = \frac{j\omega V_1 C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

测量电阻两端的输出电压为:

$$V_0 = I \frac{R}{1 + j\omega(C_d + C)R} = \frac{j\omega V_1 C_1 C_2 R}{(C_1 + C_2)[1 + j\omega(C_d + C)R]} \quad (3)$$

在感兴趣的频率 ω 处,为了使得采集到的电压处于自积分状态,应使得 $\omega(C_d + C)R$ 的乘积 $\gg 1$,所以传感器的传递函数进一步简化为:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{C_1 C_2}{(C_d + C)(C_1 + C_2)} \quad (4)$$

式(4)中,贴片电容 C 不与雨水发生直接接触,其数值在雨水环境中能够保持稳定,电容 C_1 位于传感器内部,构成电容 C_1 的测量极板与导线芯的距离较近,也不易受雨水的影响;而对地电容 C_2 ,由于配电网的架空高度原因,对地距离较远,电容边缘效应明显,其电场在雨水环境下容易发生畸变,进而使得电容 C_2 发生变化,极大影响传感器测量的稳定性,这是造成测量误差的第 1 个原因。

此外雨水环境中,空气绝缘水平降低,同时雨水在导线和传感器外壳上覆盖一层水膜,使得 C_d 两极板间的电场畸变,两极间的电势差发生突变,在等效电路中表现为并联在 C_d 两端的电容 C_k 的数值发生波动,此时传感器的递函数变为:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{C_1 C_2}{(C_d + C + C_k)(C_1 + C_2)} \quad (5)$$

对比式(4)和(5),待测电场的畸变,会导致测量结果出现较大的误差,是造成测量误差的第 2 个原因。

降雨时空气的绝缘水平的降低,以及连接传感器外壳和大地的雨水,会使得传感器上极板对地的泄露电容波动,这使得电容 C_x 无法被忽略,传递函数变为:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{C_1(C_2 + C_x)}{(C_d + C + C_k)(C_1 + C_2 + C_x)} \quad (6)$$

如式(6)所示,在以往的传感器设计中,电容 C_1 和 C_2 的数值相近,电容 C_x 波动对传递函数的影响较大,这是造成测量误差的第 3 个原因。

2 传感器结构以及工作原理

根据上述的电路等效模型,以及所提出的 3 个干扰原因,本章对传感器的设计进行了进一步的分析和仿真,并论证传感器设计的合理性。

2.1 待测电场畸变的分析

针对并联在测量电路两端的电容 C_k ,即待测电场畸变导致的测量误差,拟采取改变测量电路的方式以减小其影响。相较于易受干扰的耦合电容分压的测量方式,通过位移电流跨阻放大以获得电压信号的测量方式如图 2 所示。

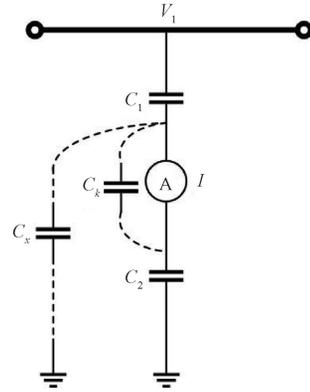


图 2 位移电流式电压传感器

Fig. 2 Displacement current voltage sensor

该测量电路的传递函数也可以通过电容 C_1 和 C_2 表示,直接获取电流信号的方式,使得传感器上下极板的电势几乎相同,减小电场畸变带来的影响;其传递函数在雨前雨后几乎相同,即:

$$\frac{I}{V_1} = \frac{j\omega C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (7)$$

对比式(5)和(7),根据以往研究中的仿真和测量结果将 C_1 、 C_2 和 $(C_d + C)$ 的值分别设置为 20、1 和 10 nF,随着电容 C_k 的增大,可以绘制出两种测量电路的误差曲线如图 3 所示。

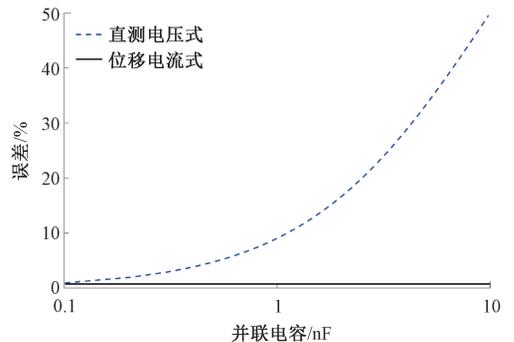


图 3 电容 C_k 对不同测量电路的影响

Fig. 3 The influence of capacitance C_k on different measurement circuits

随着电容 C_k 增大到 1 nF,受 C_k 影响的电压式传感器的测量的误差增加至 9%,而位移电流式的电压传感器误差保持不变。

2.2 等电位屏蔽结构的设计

通过电路设计的方法难以解决测量极板对地电容以及地板对地电容的数值波动问题;若使用自校准的方案,也难以应对雨水环境中快速大幅度变化的测量结果。

由此,需要对传感器的屏蔽结构进行进一步的优化设计,首先针对泄露电容 C_x 造成的测量误差,通过如下设计,以减小其影响。

为了尽可能减小泄露电容的数值,采用了等电位屏蔽的方法,在减弱外界电场和环境干扰的同时可以减小小雨水中泄露电容 C_x 的大小,所设计的等电位屏蔽结构如图4所示。

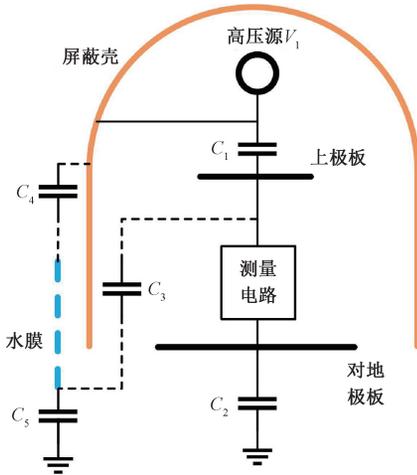


图4 等电位屏蔽传感器

Fig. 4 Equipotential shielding sensor

所设计的等电位屏蔽结构,通过输电线路绝缘层穿刺装置将屏蔽壳和输电线芯直接相连,并且在传感器的测量极板和高压源之间铺设较薄的绝缘介质,使得测量电路与屏蔽结构之间保持电气隔离,极大增加了耦合电容 C_1 的数值,减小雨水干扰。

为了验证等电位屏蔽的效果,对周围环境存在水膜时,有无等电位屏蔽的传感器探头的周围电场以及测量极板对地电容的数值进行了有限元仿真。其结果如图5所示。

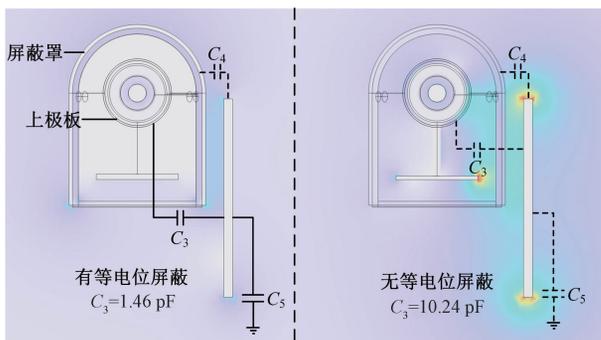


图5 等电位屏蔽罩仿真

Fig. 5 Simulation of equipotential shielding

仿真结果表明,等电位屏蔽罩能有效地减少临近水膜与传感器测量极板之间的电场分布,进而减小两者之间的耦合电容 C_3 。随着下雨导致空气绝缘水平降低,对地泄露电流及电容 C_5 会逐渐增大,会出现较大的测量误差。

为了更好地对上述情况进行分析,根据仿真结果可以绘制出等效电路图,如图6(a)所示,其中 C_1 为测量极板与高压源之间的电容, C_2 为地板对地的电容。电容 C_3 、 C_4 和 C_5 构成了形同电桥的结构,根据星三角变换原则,可以将其变换为如图6(b)所示。

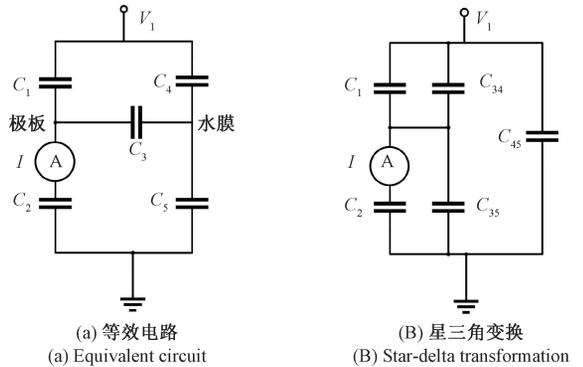


图6 雨水干扰模型的等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of rain disturbance model

从图6(b)可以得出位移电流的计算公式为:

$$I = V_0 s C_2 \left(\frac{C_1 + C_{34}}{C_1 + C_{34} + C_2 + C_{35}} \right) \quad (8)$$

式中:

$$C_{34} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4 + C_5} \quad (9)$$

$$C_{35} = \frac{C_3 C_5}{C_3 + C_4 + C_5} \quad (10)$$

如式(8)所示,为了使流过测量电路的电流保持稳定,不仅可以减小电容 C_{34} 和 C_{35} 的数值实现,另一方面增大 C_1 的数值也可以使电流趋于稳定。在传感器探头的实际运用场景中,电容 C_{34} 的数值较小,且难以进行控制,由此位移电流 I 的计算公式可以写为:

$$I = V_1 s C_2 \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_{35}} \right) \quad (11)$$

根据有限元仿真计算的结果,使用该等电位屏蔽方法时,泄露电容 C_{35} 会被减小到 3 pF 以下。

此外,所设计的传感器探头结构,传感器电容 C_1 的值在 300 pF 左右,而不破坏导线绝缘层的非接触式传感器由于测量极板和导线芯之间绝缘层厚度的限制,其电容 C_1 的值一般 < 20 pF,随着泄露电容增大,不同 C_1 数值情况下,式(11)的计算结果如图7所示。

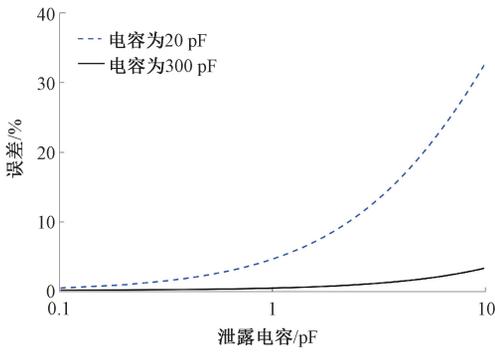


图 7 泄漏电容对测量误差的影响

Fig. 7 The influence of leakage capacitance on measurement error

当雨水导致电容 C_{35} 增大至 3 pF 时, C_1 为 20 pF 的传感器误差为 12.51%, 而 C_1 为 300 pF 的传感器误差仅为 1.15%。

2.3 等电位屏蔽结构的优化

最后, 由于配电网架空高度的原因, 传感器的对地电容的边缘效应显著, 而在雨水环境下, 雨水作为临近导体使得传感器的对地电场发生畸变, 对地电容边缘效应减弱^[26], 会使得传感器对地电容发生变化。雨水使得电场畸变的示意图如图 8 所示。

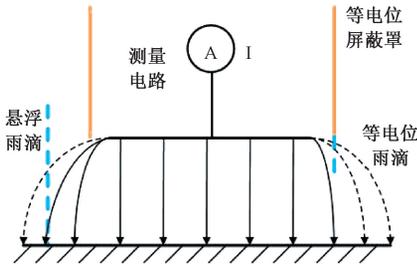


图 8 雨水使电场畸变

Fig. 8 Rainwater distorts the electric field

在传感器的雨水干扰实验中发现, 传感器对地电容的数值与雨水到传感器对地极板之间的距离 d 以及传感器屏蔽罩下沿超出对地极板水平面的长度 h 相关; 同时实验发现, 在等电位屏蔽的条件下, 雨水在屏蔽罩表面形成水膜时, 才会对传感器测量结果有比较明显的干扰; 此外为了使得仿真结果更易观察变化的趋势, 使用一整块导电板模拟传感器表面的水膜, 而不使用离散雨滴进行仿真。仿真结构如图 9 所示, 其中导电板与传感器屏蔽罩外壳设置为同一导电终端。

出于便于安装和传感器运行安全性的考虑, 距离 d 在仿真中被限制在了 40 mm 以内, 而长度 h 设置为超出对地极板 10 mm 和没有超出对地极板两种, 将仿真分为了 6 组, 如表 1 所示。

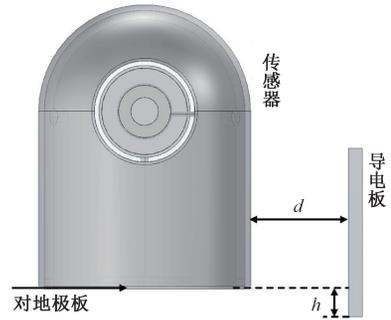


图 9 对地电容参数化扫描

Fig. 9 Parameterized scanning of ground capacitance

表 1 6 组仿真的参数设置

Table 1 Parameter settings for 6 sets of simulations

分组	d	h
S1	10	0
S2	10	10
S3	20	0
S4	20	10
S5	40	0
S6	40	10

为了对雨水水膜从传感器屏蔽罩下沿滴落的情况进行模拟, 在仿真中使导电板下沿 h 增大 15 mm。根据仿真得到的对地电容值的变化, 绘制了如图 10 所示的对地电容变化曲线。在 15 mm 的范围内, 随着导电板 h 的增大, 传感器的对地电容 C_2 呈现线性减小; 此外, 参数 h 和 d 对电容 C_2 的变化趋势有显著影响, 导电板的下沿与对地极板水平, 导电板与传感器距离 d 大时, 电容的变化较小, 其中实验组 S5 的前后电容变化比最小为 5%, S2 的前后电容变化比最大为 15%。

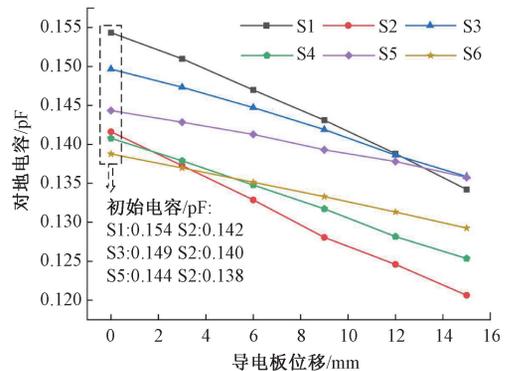


图 10 对地电容仿真结果

Fig. 10 Simulation results of ground capacitance

3 用于实验的传感器探头和电路

3.1 位移电流的 IV 变换

文献[27]设计了一种直测式的位移电流测量电路,在此基础上,新型传感器通过 IV 变换的方式得到电压信号,所设计的调理电路的原理图如图 11 所示。

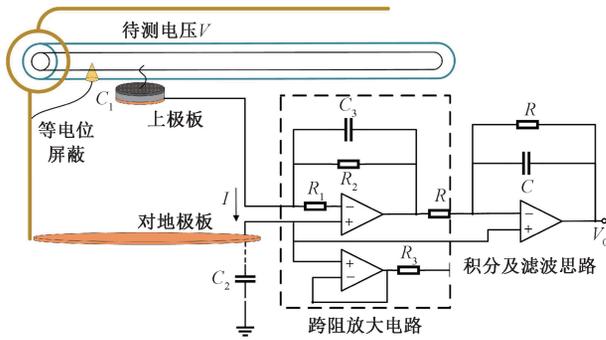


图 11 位移电流测量电路

Fig. 11 Diagram of displacement current measurement circuit diagram

图 11 中 R_2 为进行 IV 变换的电阻,大小为 $1\text{ M}\Omega$,同时为了防止闭环电路出现自激振荡,在 R_2 上并联一个电容 C_3 ,获得的电压信号的计算如式(12)所示。

$$V_0 = V_1 s C_2 \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_{35}} \right) R_2 \quad (12)$$

由于该结构位移电流 I 极小,其数值在 $1\text{ }\mu\text{A}$ 以下,为了减少干扰,设计了如图 11 虚线部分所示的有源屏蔽结构。同时在后端加上积分及滤波电路。通过仿真其幅频及相频响应曲线如图 12 所示,其中 m 表示千分之一。该电路满足对工频配电网电压测量的要求,最后使用无线示波器采集信号,通过 WiFi 传输到上位机,显示采集到的电压波形和有效值。

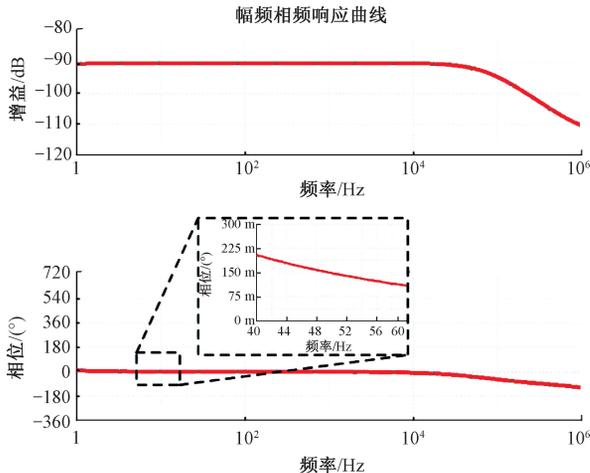


图 12 幅频及相频响应曲线

Fig. 12 Amplitude frequency phase frequency response curve

3.2 等电位屏蔽的传感器探头

新型的传感器探头的横截面如图 13 所示,根据前文的描述,将屏蔽罩和导电海绵与输电线路内部导体相连,而测量电路的上极板与导电海绵之间覆一层很薄的绝缘介质。

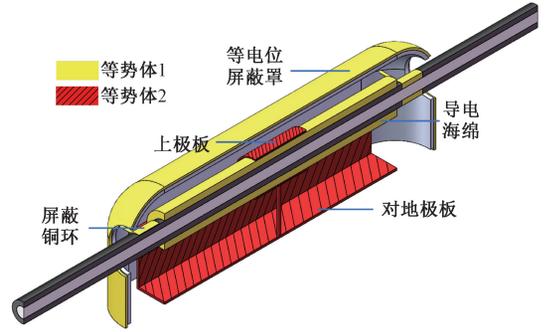


图 13 等电位屏蔽探头设计

Fig. 13 Design drawing of equipotential shielding probe

图中的等势体 1 为屏蔽端,等势体 2 是测量端,等电位屏蔽要求其电势相近。此外为了提高屏蔽罩的屏蔽效果,在传感器的两侧导线上,加上与导线直径相同的屏蔽铜环,同时传感器的对地极板尺寸要大于上极板,减小调理电路和上极板的对地电容。

为了验证传感器探头设计的合理性,制造了如图 14 所示的两个探头,以进行雨水干扰的对比实验,其屏蔽罩外壳到对地极板的距离 d 分别为 10 和 40 mm。长度 L 均为 300 mm,高度为 82 mm。结构 A 的测量电路对地极板与屏蔽罩下沿齐平,而结构 B 的对地极板与屏蔽罩下沿有 10 mm 的高度差。

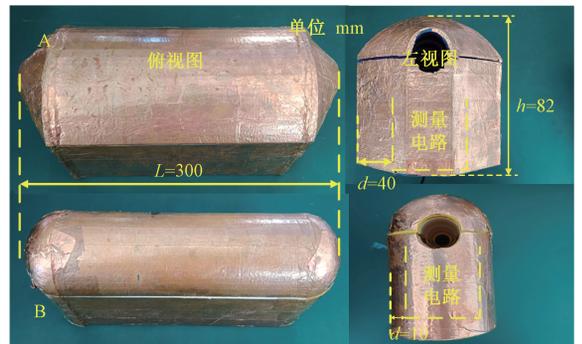


图 14 探头示意图

Fig. 14 Diagram of the probe

4 实验结果及分析

4.1 实验平台的搭建

首先搭建了如图 15 所示的实验平台。

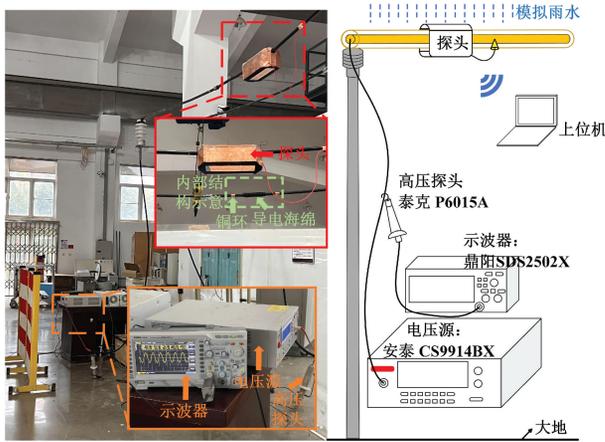


图 15 实验平台示意图

Fig. 15 Diagram of experimental platform

其中,待测的电压信号源为安泰 CS9914BX 程控耐压测试仪,其可以提供 40~400 Hz,0.050~5.000 kV 的交流信号,输出电压的精度为 $\pm 5\%$,此外为了对主流的星型接线的 10 kV 配电网相电压进行电压测量实验,使用调压器配合变压器输出 5.77 kV 的交流信号;交流输出信号由泰克 P6015A 高压探头和鼎阳 SDS2502X Plus 示波器进行校准,校准设备精度为 1% 满足实验精度要求。实验时,将传感器安装在距离地面 3 m 的架空导线上对其进行喷淋实验;采用小型无线 WiFi 示波器进行采样,采样频率为 90 kHz,安装在测量装置内部,并通过无线 WiFi 模块将信号传入上位机中,在上位机软件中显示波形和有效值。

4.2 测量精度的对比实验

在图 15 所示的实验平台中,对图 14 中的两个探头结构进行了对比实验。实验时对传感器整体进行均匀的喷淋试验,尽可能保证整个传感器都被雨水均匀淋湿,喷淋停止且将传感器表面擦干时视为潮湿状态,在工频 1~5.77 kV 的输入电压下,分别记录传感器在干燥、潮湿和持续喷淋的情况下,测得电压的有效值,实验结果如表 2 所示。

在干燥情况下传感器输出电压信号的线性度,以及在潮湿和雨水条件下的测量误差如图 16 所示。

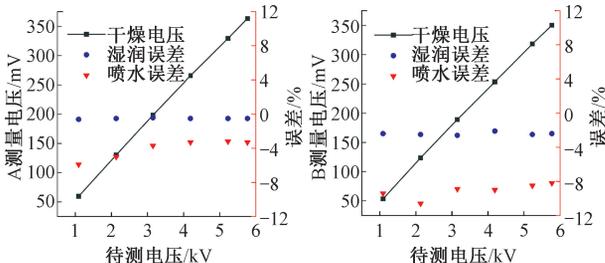


图 16 测量精度拟合曲线

Fig. 16 Measurement accuracy fitting curve

表 2 测量精度对比结果

Table 2 Comparison results of measurement accuracy

结构	待测电压/kV	干燥/mV	潮湿/mV	雨水/mV
A	1.09	59.5	59.1	56.0
	2.13	130.3	129.6	123.8
	3.15	198.5	197.6	192.1
	4.19	265.6	264.1	256.9
	5.23	329.3	327.7	318.8
	5.77	363.6	361.7	351.5
B	1.09	53.5	52.2	48.5
	2.13	123.6	120.5	110.5
	3.15	189.3	184.4	172.4
	4.19	253.5	248.2	230.5
	5.23	318.2	310.3	290.4
	5.77	350.2	341.9	321.6

从图 16 中可以看出,两个结构在目标电压 5.77 kV 的 20%~100% 范围内拥有良好的线性度。相比起结构 B,结构 A 在传感器尺寸增大不明显的情况下,表面湿润时测量的误差从结构 B 的 2.5% 左右,降低到了 0.5% 左右。而对传感器持续喷淋时,结构 B 的误差到达了 9%,而结构 A 的误差基本控制在 5% 以内,该对比实验中结构 A 表现出了更好的稳定性。

在实验中测得的电压在干燥和喷淋条件下均为正弦波形,如图 17 所示,即便是幅值波动较大的结构 B 的电压信号,其余波形特征都几乎没有变化;由于调压器及调压器输出 5.77 kV 的波形本身带有畸变,图 17 为耐压测试仪输出的 5 kV 波形信号。

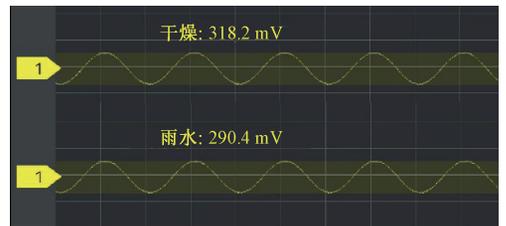


图 17 结构 B 测量波形对比

Fig. 17 Comparison of measurement waveforms for structure B

4.3 复杂环境适应性测试

在传感器的实际运行中,雨水有降雨量大小的变化,同时刮风导致雨水落于传感器不同相对位置时的耦合电容略有不同,因此对传感器进行了环境适应性实验。在工频 5.77 kV 的输入电压条件下,通过喷水壶对传感器进行喷淋实验,以对喷淋位置和雨水大小进行控制;通过

雨量杯 5 min 收集的雨量换算为 mm/h 对短期降雨的雨强进行大致的区分,其中根据标准 2.5 mm/h 为小雨,6 mm/h 为中雨,9 mm/h 为大雨;分别对传感器 A 的侧面,两侧的输电线路进行喷淋实验,以及对传感器及输电线路 2 m 的全局范围内进行扫略式的喷淋,重复上述实验得到传感器测量的有效值如表 3 所示。

表 3 复杂环境适应性实验

Table 3 Experiment on adaptability to complex environments (mV)

雨强	干燥	两侧	线路	全局
大	362.8	360.9	362.1	355.3
中	362.8	361.7	361.3	357.4
小	362.8	361.2	362.2	359.5

传感器 A 在不同测试条件下输出电压信号的对比以及相对于干燥条件下的测量误差如图 18 所示,对传感器两侧,以及两侧的输电线路进行喷淋实验,传感器的误差都在 0.5% 以内,在 2 m 范围内进行扫略式的喷淋实验时,误差在 2.2% 以内。

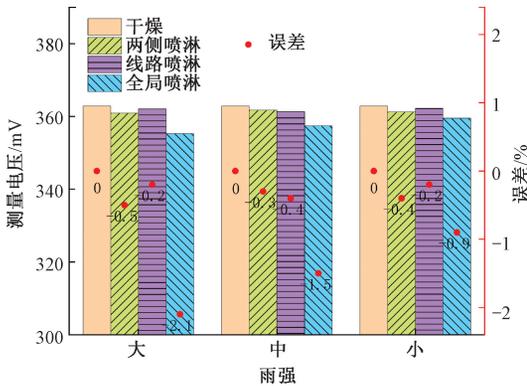


图 18 复杂环境测量误差

Fig. 18 Measurement errors in complex environments

前文实验中对 5.77 kV 工频电压进行测量时,传感器 A 误差为 3.3%,在环境适应性实验中测量误差均为超过 3.3%。

5 结 论

本研究对浮地式电压传感器受雨水干扰的原理进行了分析,并在此基础上基于等电位屏蔽和位移电流测量相结合的方法,设计了一种新型的抗雨水干扰能力较强的电压传感器。

之后通过设计对比实验和传感器的环境适应性实验验证了所设计的传感器的合理性。实验结果表明,所设计的电压传感器,在工频 5.77 kV 待测电压的条件下,表

现出较好的测量稳定性,在不同的模拟雨水条件下传感器的测量误差都在 3.3% 以内。

由测试结果可知,所设计的传感器具有较强的抗雨水干扰的能力,但是相关研究和实验主要是针对工频待测电压进行的,抗雨水干扰的宽频带电压传感器还有待未来进一步的研究。

参考文献

- [1] 黄汝金,索春光,张文斌,等. 基于阻抗变换的非接触电压测量自校准方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 137-145.
HUANG R J, SUO CH G, ZHANG W B, et al. A self-calibration method of non-contact voltage measurement based on impedance transformation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3): 137-145.
- [2] 魏冉,张文斌,索春光,等. 非侵入式电压传感技术研究进展[J]. 电网技术, 2025, 49(11): 4865-4875.
WEI R, ZHANG W B, SUO CH G, et al. Research progress on non-invasive voltage sensing methods[J]. Power System Technology, 2025, 49(11): 4865-4875.
- [3] 穆舟,江波,赵伟,等. 电力系统暂态过电压测量技术综述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 1-13.
MU ZH, JIANG B, ZHAO W, et al. Reviews on the measurement techniques of transient overvoltage in power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 1-13.
- [4] 李振华,赵爽,胡蔚中,等. 高电压测量技术研究综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3910-3919.
LI ZH H, ZHAO SH, HU W ZH, et al. Reviews of the study of high voltage measurement technology[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3910-3919.
- [5] 杨庆,董富宁,罗曼丹,等. 宽频电压感知方法及其数据应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(6): 1969-1983.
YANG Q, DONG F N, LUO M D, et al. Wideband voltage sensing methods and sensing data applications[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1969-1983.
- [6] ZHOU X, CHEN SH, WANG H, et al. Experiment on leader propagation characteristics of air gaps in UHVDC transmission towers under positive switching impulse voltages[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(3): 42-48.
- [7] TELUKUNTA V, PRADHAN J, AGRAWAL A, et al. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 365-379.
- [8] 杨庆,董恒,陈少卿,等. 基于一次电光效应的非接

- 触式过电压监测传感器[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 140-145.
- YANG Q, DONG H, CHEN SH Q, et al. Non-contact overvoltage monitoring sensor based on electro-optic effect[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 140-145.
- [9] 白月, 康建龙, 刘新宇, 等. 基于电场耦合原理的SiC MOSFET 开关电压感知探头[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(7): 77-87.
- BAI Y, KANG J L, LIU X Y, et al. SiC MOSFET switching voltage sensing probe based on electric field coupling principle[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(7): 77-87.
- [10] 许守东, 张文斌, 吴远密, 等. 非侵入式电压测量双平板电容传感器设计[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(9): 119-122.
- XU SH D, ZHANG W B, WU Y M, et al. Design of double plate capacitive sensor for noninvasive voltage measurement[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(9): 119-122.
- [11] 汪毅峰, 李江涛, 徐峥一, 等. 基于电容耦合式电极的非接触式 ECG 采集方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 138-147.
- WANG Y F, LI J T, XU ZH Y, et al. A non-contact ECG measurement method based on capacitance coupling electrodes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 138-147.
- [12] CHU S Y, CUI X, ZAN X, et al. Transfer-power measurement using a non-contact method for fair and accurate metering of wireless power transfer in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1244-1271.
- [13] 陈叶倩, 吴光敏, 张文斌, 等. 基于电场的快速暂态过电压测量[J]. 传感技术学报, 2017, 30(3): 385-390.
- CHEN Y Q, WU G M, ZHANG W B, et al. Measurement of VFTO based on electric field sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(3): 385-390.
- [14] HAN R, YANG Q, SIMA W X, et al. Non-contact measurement of lightning and switching transient overvoltage based on capacitive coupling and Pockels effects[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 139: 93-100.
- [15] 谢荣斌, 薛静, 靳斌, 等. 基于分布式地电压测量的开关柜放电溯源方法[J]. 高压电器, 2025, 61(1): 19-29.
- XIE R B, XUE J, JIN B, et al. Location method for partial discharge in switchgear cabinet based on distributed transient earth voltage measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(1): 19-29.
- [16] DAVARPANAH M, SANAYE-PASAND M, BADRKHANI AJAEI F. Compensation of CVT increased error and its impacts on distance relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1670-1677.
- [17] 周文, 梁纪峰, 焦亚东, 等. 电容式电压互感器电压暂降测量误差分析及校正[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 49-58.
- ZHOU W, LIANG J F, JIAO Y D, et al. Error analysis and correction of voltage sag measurement for capacitor voltage transformer[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 49-58.
- [18] LAWRENCE D, DONNAN J S, LEEB S, et al. Non-contact measurement of line voltage[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 8990-8997.
- [19] WANG Q CH, ZHANG W B, ZHAO H R, et al. Research on adaptive calibration technique for noncontact voltage sensors based on parameter-independence architecture[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(19): 37151-37160.
- [20] 杨怀远, 庄池杰, 谢施君, 等. 非接触式暂态电压测量的简化解耦方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1948-1954.
- YANG H Y, ZHUANG CH J, XIE SH J, et al. Simplified decoupling method for non-contact transient voltage measurement[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1948-1954.
- [21] QIU S Y, QI L, ZHANG X Y, et al. Parameter design and transfer characteristic optimization of floating-ground capacitive voltage divider for wideband high voltage measurement[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2025, 11(4): 1693-1703.
- [22] ZHENG J CH, LI B, ZHA K P, et al. Equipotential shielding voltage sensor for contact measurement of transient voltage in EHV/UHV power grids[J]. High Voltage, 2021, 6(2): 291-301.
- [23] 李江, 张文斌, 周宇, 等. 电容变换的自校准浮地电压传感器[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(6): 255-260.
- LI J, ZHANG W B, ZHOU Y, et al. Capacitance-transformed self-calibrated floating-ground voltage sensor[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(6): 255-260.
- [24] YIN F H, SHI SH L, LI J CH, et al. Simulation study of the measurement characteristics of equipotential shielding

capacitor voltage divider [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(2): 849-858.

- [25] HUANG R J, ZHANG W B, SUO CH G. Non-contact voltage measurement of residential cables based on internal parameter conversion and centering probe assistance [J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(1): 015024.
- [26] 廖芳. 基于电场感应的非接触式电压传感器分布电容特性的研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.
LIAO F. Research on the distributed capacitance characteristics of non-contact voltage sensors based on electric field induction[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [27] 邵霞, 周有庆, 彭红海. 一种改进的直测电容电流型电子式电压互感器[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 240-247.
SHAO X, ZHOU Y Q, PENG H H. An improved electronic voltage transformer based on direct detecting capacitor current [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 240-247.

作者简介



张文斌, 分别在 2004 年和 2009 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为昆明理工大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为非接触电压电流测量, 电磁测量及电磁场传感器、智能传感器以及信息处理。

E-mail: zwbscg@126.com

Zhang Wenbin received his M. Sc. and Ph. D. degrees both

from Harbin Institute of Technology in 2004 and 2009, respectively. He is currently an associate professor and a master's advisor at Kunming University of Technology. His main research interests include non-contact voltage and current measurement, electromagnetic measurement electromagnetic field sensor, intelligent sensor, and information processing.



赵宏瑞, 2022 年于南京航空航天大学获得学士学位, 现为昆明理工大学硕士研究生, 主要研究方向为非接触电压测量。

E-mail: 1923558394@qq.com

Zhao Hongrui received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2022. He is currently a master's student at Kunming University of Technology. His main research interest includes non-contact voltage measurement.



谭向宇 (通信作者), 2005 年于华北电力大学获得学士学位, 2010 年于西安交通大学获得博士学位 (提前攻博), 现为云南电网有限责任公司电力科学研究院教授级高工, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

E-mail: 2040464@163.com

Tan Xiangyu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2005, and his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2010 (through the direct PhD program). He is currently a professor-level senior engineer at the Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd. His main research interests include high voltage and insulation technology.