

## 面向架空输电线路的防外破装置设计<sup>\*</sup>

花国祥<sup>1,2</sup> 高峰<sup>1</sup> 肖杨<sup>3</sup> 纪林锋<sup>3</sup>

- (1. 无锡学院自动化学院 无锡 214105;  
2. 华北电力大学电气与电子工程学院 北京 102206;  
3. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044)

**摘要:**针对传统防外破技术抗干扰能力弱、适配性低、报警效果差以及平板电容型传感器对称结构中存在的边缘效应问题,研制一种适用于多组态与多电压等级架空输电线路的防外破装置。首先,分析感应电压与场强关系,进行等位环结构改进并完成PCB设计制作,利用Ansys Maxwell搭建多组态与多电压等级架空输电线路仿真模型,为报警阈值设定提供理论依据;其次,完成防外破装置的硬件与软件设计,实现不同线路情况下的电压档位选择、电场信号采集处理以及声光报警等功能;最后,搭建10 kV模拟架空输电线路高压实验环境并进行现场验证,测试分析装置的工作性能。结果表明,所设计的防外破装置感应电压测量平均相对误差在3%以内,与测试电压线性相关系数 $R=0.9997$ ,其变化规律符合电场分布规律;现场报警成功率为100%,装置稳定可靠、兼顾精准性与线性度要求。

**关键词:**防外破;电场传感器;多组态与多电压等级;Ansys 仿真

**中图分类号:** TM726.3;TM933.2;TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Design of anti-external breakage device for overhead transmission lines

Hua Guoxiang<sup>1,2</sup> Gao Feng<sup>1</sup> Xiao Yang<sup>3</sup> Ji Linfeng<sup>3</sup>

- (1. School of Automation, Wuxi University, Wuxi 214105, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** In view of the weak anti-interference ability, low adaptability, poor alarm effect and the edge effect in the symmetrical structure of the traditional flat capacitive sensor, an anti-breakage device for multi-configuration and multi-voltage level overhead transmission lines is developed. Firstly, this paper analyzes the relationship between induced voltage and field strength, improves the structure of equal potential belt and completes the PCB design, the multi-configuration and multi-voltage level overhead transmission line simulation model is built by using Ansys Maxwell to provide theoretical basis for alarm threshold setting; secondly, the hardware and software design of the anti-breakage device is completed to realize the functions of voltage level selection, electric field signal acquisition and processing, and sound and light alarm under different line conditions; finally, a 10 kV simulated overhead transmission line high-voltage experimental environment is built and field verification is carried out to test and analyze the working performance of the device. The results show that the average relative error of the anti-breakage device's inductive voltage measurement is within 3%, the linear correlation coefficient with the test voltage is  $R=0.9997$ , and it's change law is in accordance with the electric field distribution law; live alarm success rate is 100%, the device is stable and reliable, taking into account the accuracy and linearity requirements.

**Keywords:** anti-external breakage; electric field sensor; multi-configuration and multi-voltage level; Ansys simulation

收稿日期:2023-08-31

<sup>\*</sup> 基金项目:2023年江苏省研究生实践创新计划(SJCX23\_0388)、中国南方电网广东茂名供电局科技项目(030900KK52220007)、2020r006 无锡学院人才启动项目(550220006)资助

## 0 引言

架空输电线路有着“电力传输桥梁”的称号,不仅数量众多且分布多为山川江河、施工工地、高楼建筑及道路等复杂环境,在推动经济社会高质量发展的同时,也面临着严重的外力破坏隐患。其周围的吊车等大型作业机械设备施工碰撞线路是导致事故发生的主要原因,不仅造成严重的生命安全事故,更带来巨大的经济损失,严重威胁输电线路的安全稳定运行,已成为亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。

传统防外破方法主要有<sup>[2]</sup>人工定期巡检、发放安全手册、涂刷警示标语、视频监控装置等。这些方法存在依赖人力且效率低下、时效性差、智能化程度低等缺陷,已无法满足电网现代化建设需求。近年来随着雷达、图像处理、智能传感、北斗定位等技术的进步,防外破工作中也涌现出一些新型技术手段。文献[3]将毫米波雷达测距与视觉识别应用于机械设备防外破,实现非同源传感器融合监测,但毫米波雷达应用成本高、易受环境干扰影响测量精度,所用单目相机测量范围有限,线路因遮挡物影响识别精度较低。文献[4]提出一种基于绝对差和梯度函数(absolute difference-census, AD-Census)的半全局块匹配(semi-global block matching, SGBM)算法并结合目标检测算法(you only look once version 4, YOLOv4)实现对输电线路的测距与检测,但对于细且长的线路图像,目标检测因误框选区域较大影响检测精度,视觉测距易受光照等环境干扰,对于弱纹理区域处理能力不足。文献[5]提出一种基于声阵列的智能监控系统,通过轻量化声阵列微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)与时频域特征进行数据采集和判断,触发监控系统拍照上传至接收终端,但其虚警率较高,在考虑4G运行成本的情况下实时监控时间较短。文献[6]提出一种基于北斗的智能防外破监管系统,但其输电线路网络系统构建需要大量基础数据进行图层构建与数据标注整合,成本高难以普及。

非接触式主要通过传感实现对线路附近电气量信号的测量,具有结构简单、灵敏度高、成本低等优点,电气量信号在传感与测量领域中的发展已成引入防外破工作的必然选择<sup>[7]</sup>。目前,应用于我国工频交流输电线路的非接触式传感测量方法主要有光学式 Pockels 效应法、紫外脉冲法以及电磁感应法<sup>[8-10]</sup>。光学式测量传感器适用于交直流混合场,其绝缘度高且稳定性强,但锗酸铋(Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>, BGO)晶体灵敏度易受材质、大小和温度的约束<sup>[11-12]</sup>。紫外脉冲法适用于特高压输电线路电力设备电晕放电检测,由于紫外线环境中存在大量干扰,其对工作环境要求苛刻,应用成本高且不易推广<sup>[13]</sup>。文献[14]提出一种新型电容耦合型电压传感器,测量系统由电容探头、模拟前端(active front end, AFE)、嵌入式数字信号处理平台组成,系统稳定且精确度高,但其只验证了低压输入下的幅频特性改善情况,无法适用于高压输电线路。文献[15]设计一种多电极阵列的电磁感应式电压传感器结

构及信号处理方法,有效减少了传感器体积以及由导线和传感器的相对位置变化引起的误差,但该传感器只适用于工频 50 Hz 的 220 V 低压配网,无法适用于高压输电线路防外破工作。适用于防外破工作中的电磁感应传感器主要有球型传感器与平板电容型传感器,两者在测量性能方面差别较小,在均匀与非均匀分布电场下的测量误差为 1%~2%,均满足实际工程中的感应电压测量要求<sup>[16]</sup>。相较于球型传感器,平板电容型传感器处于空间电场时造成的畸变较小且易于量产制作。

因此,为解决以上问题,本文通过自构式平板电容型电场传感器设计提出一种适用于多组态与多电压等级架空输电线路的防外破装置,安全可靠、智能便捷,适配实际环境使用要求,为防外破工作提供智能化新方式。

## 1 自构式电场传感器测量原理

理想状态下传统平板电容型传感器结构原理如图 1 所示。

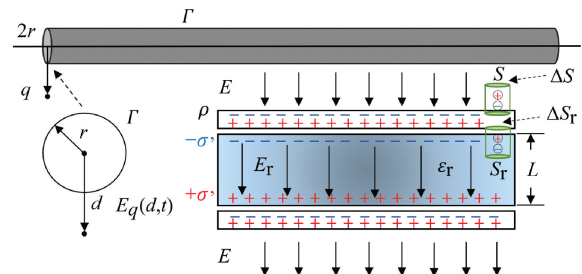


图1 传统平板电容型传感器结构原理

图 1 中,忽略线路弧垂效应与轴向电场,将输电线路视为圆柱体,由高斯定理与模拟电荷法可知,实心导体内部静电平衡,任意处高斯面电通量为 0,场强处处为 0,分布在线路外表面的电荷可用内部离散电荷代替。 $E$  为外部电场; $\Gamma$  为线路边界; $L$  为极板间距; $\epsilon_r$  为中间介质相对电容率; $r$  为导线半径; $q$  为线路附近任意一点,距线路中心距离为  $d$ 。

架空线路边界条件表示为:

$$\begin{cases} V|_{r} = V_0(t) \\ V|_{r \rightarrow \infty} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$Q(t)$  为等效电荷,  $\epsilon$  为空气相对电容率,则点  $q$  处电场强度  $E_q(d, t)$  与电位  $V_q(d, t)$  分别为:

$$\begin{cases} E_q(d, t) = \frac{Q(t)}{4\pi\epsilon d^2} \\ V_q(d, t) = \frac{Q(t)}{4\pi\epsilon d} \end{cases} \quad (2)$$

因此,点  $q$  处的场强与架空线路导线电压之间的关系可表示为:

$$E_q(d, t) = \frac{r}{d^2} V_0(t) \quad (3)$$

$E_r$  为极板间内部电场,由内部极化电荷  $\sigma'$  产生的极化电场与外部电场组成,在平行极板上端正负电荷表面取

圆柱高斯面  $S$  与  $S_r$  且与极板平行, 面积分别为  $\Delta S$  和  $\Delta S_r$ , 假设正电荷表面电荷密度为  $\rho(t)$ , 则负电荷表面电荷密度为  $-\rho(t)$ , 由高斯定理可知:

$$\begin{cases} \oint_S E(t) dS = -E(t) \Delta S = \frac{\rho(t) \Delta S}{\epsilon} \Rightarrow \\ E(t) = \frac{-\rho(t)}{\epsilon} \\ \oint_{S_r} E(t) dS = E_r(t) \Delta S_r = \frac{-\rho(t) \Delta S_r}{\epsilon_r} \Rightarrow \\ E_r(t) = \frac{-\rho(t)}{\epsilon_r} \end{cases} \quad (4)$$

继而可以得到极板内部电场与外部电场关系:

$$E_r(t) = \frac{\epsilon}{\epsilon_r} E(t) \quad (5)$$

由式(5)可知, 当介质相对电容确定时,  $E_r(t)$  与  $E(t)$  成正比关系, 再根据匀强电场下电势差与电场强度关系, 则有感应电压  $U_0(t)$  为:

$$U_0(t) = L \frac{\epsilon}{\epsilon_r} E(t) = L \frac{\epsilon r}{\epsilon_r d^2} V_0(t) \quad (6)$$

当极板间距离确定时, 某一位置处的感应电压  $U_0(t)$  与外部电场强度  $E(t)$  和导体电位  $V_0(t)$  成正比关系, 因此, 可以根据线路场强分布确定安全距离处的最小感应电压并作为防外破装置报警阈值。

在非理想状态下, 平板电容型传感器上下感应极板面积有限且距离很近, 内部区域电场与电荷分布近似均匀, 但在电极边缘区域电场线由平行线呈现出开口分布, 引起极板间电场分布不均即为边缘效应, 导致传感器灵敏度下降与非线性问题。因此, 为提高传感器测量精度, 避免边缘效应影响, 在传统平板电容型传感器的基础上, 采用等位环结构进行自构式电场传感器设计, 如图2所示。

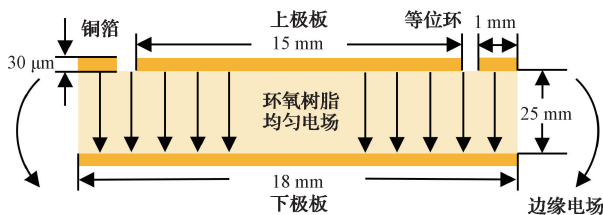


图2 自构式电场传感器结构尺寸

图2中, 等位环宽度为1 mm, 与上级板电位相等, 使得上级板边缘电场线平直, 上下极板间电场基本均匀, 发散边缘电场位于等位环外围, 避免附加电容即传感器理论电容小于实际电容的影响。电极材质为铜箔, 厚度为  $30 \mu\text{m}$ , 介质材料为环氧树脂, 上级板直径为15 mm, 下级板直接为18 mm, 极板间距  $L = 25 \text{ mm}$ , 传感器印刷电路板(printed circuit board, PCB)设计与实物如图3所示。

## 2 多模型仿真与报警阈值设定

多模型架空输电线路采用 Ansys Maxwell 仿真, 将三

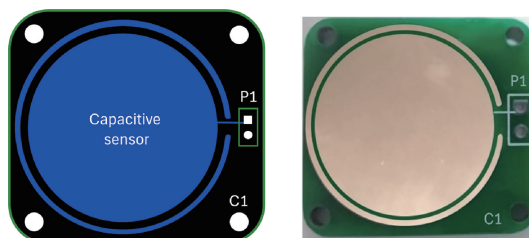


图3 传感器 PCB 设计与实物

维电场简化为二维电场, 分裂导线等效替换, 交变电场简化为准静态场。根据 GB 50061—2010“66 kV 及以下架空电力线路设计规范”与 GB 50545—2019“110~750 kV 架空输电线路设计规范”设置仿真模型参数<sup>[17]</sup>, 导线材质为铝芯, 处于真空介质, 采用气泡边界, 线路与介质网格划分最大元素长度分别为0.2和1 m, 求解器自适应频率为50 Hz。输电线路规格参数如表1所示。

表1 输电线路规格参数

电压等级/kV	导线截面积/mm <sup>2</sup>	等效半径/mm
10	120	6.18
35	185	7.67
66	240	8.74
110	300	9.77
220	400	11.28
500	1 600	22.56

同时根据“国家电网电力安全工作规程(线路部分)”规定, 对于作业机械任何部位应与高压架空输电线路保持足够安全距离。因此, 防外破装置安装于施工机械顶部, 如挖掘机抓斗、吊车吊臂等, 最小安全距离如表2所示。

表2 施工机械临近高压输电线路的最小安全距离

电压等级/kV	最小安全距离/m
10 及以下	2
35	4
66/110	5
220	6
500	8.5

各电压等级下的输电线路排列方式主要有水平、三角、垂直、“上”字型、鼓型<sup>[18]</sup>。图4所示为500 kV双回鼓型、单回水平、单回三角排列示意图。

根据文献[19]可知, 输电线路任意方向电场强度随距离增加而减小, 呈现反比例关系且对称结构排列径向电场呈对称分布。因此, 分析常见模型输电线路下方最小安全距离处、A或C相线以最小安全距离为半径的1/4圆处的电场强度, 设定安全线并选取测试点, 如图5所示。

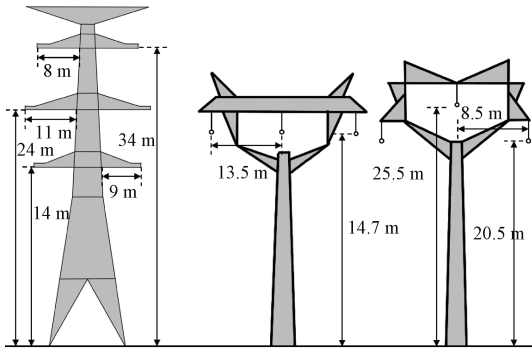
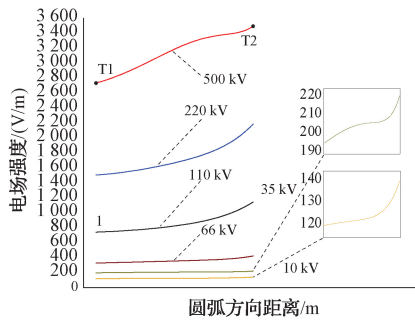


图4 500 kV 双回鼓型、单回水平、单回三角塔型

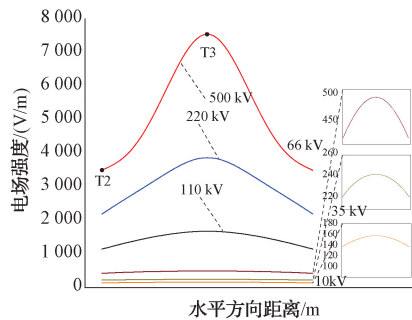
## 2.1 电场分布与仿真分析

### 1) 三相单回路

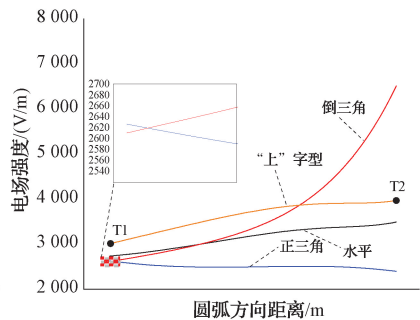
首先,分析各电压等级在三相单回路同一排列方式下



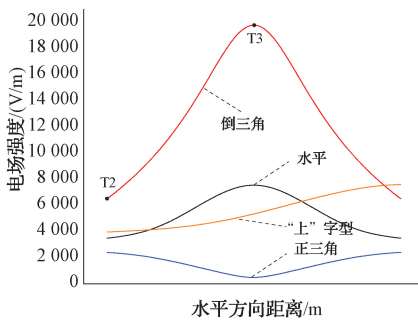
(a) 各电压等级单回水平排列安全线1处



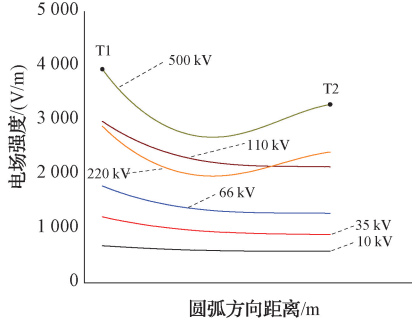
(b) 各电压等级单回水平排列安全线2处



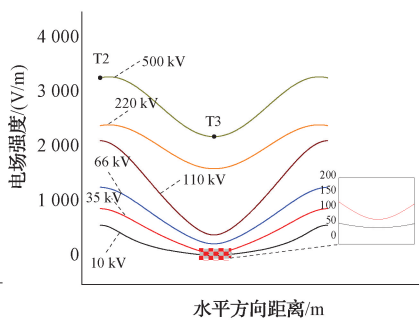
(c) 500 kV单回多排列安全线1处



(d) 500 kV单回多排列安全线2处



(e) 各电压等级双回鼓型排列安全线1处



(f) 各电压等级双回鼓型排列安全线2处

图6 电场强度随距离变化曲线

其次,分析同一电压等级在三相单回路不同排列方式下的安全线处电场分布情况,500 kV时,由图6(c)与(d)可知,同一电压等级在不同排列方式下的电场强度变化呈现多样化趋势。其中,安全线测试点T1处的最小电场强度在倒三角排列下测得,T2与T3处的最小电场强度均在正三角排列下测得,分别为2 614.32、2 397.74、497.42 V/m。因此,500 kV三相单回路感应电压最小值在正三角排列T3处测得,其余电压等级相同,在T3处的电场强度分别为424.29、369.99、337.15、254.46、146.87 V/m。

### 2) 三相双回路

同塔双回路输电线路架塔型主要为鼓型自立塔,因此,

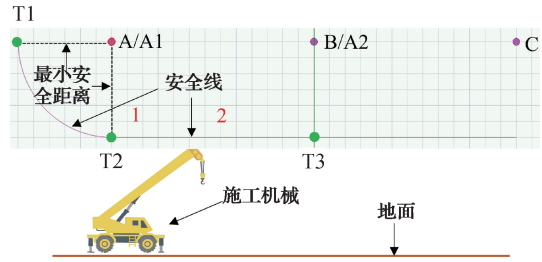


图5 安全线与测试点分布

的安全线处电场分布情况,如图6所示。由图6(a)与(b)可知,在安全线1处随着距离的增加电场强度均呈现单调递增趋势,在安全线2处电场强度均呈现先增后减趋势且左右分布对称,最小电场强度均在T3处测得,各电压等级在同一组态下的电场强度变化规律相同。

分析各电压等级在三相双回路鼓型排列方式下的电场分布情况,不同回路相序相同,图7所示为500 kV仿真模型。

由图6(e)与(f)可知,电场强度除500与220 kV因最小安全距离较大在安全线1处呈现出先减后增的趋势外,其余电压等级在安全线处变化趋势基本一致,最小电场强度均在T3处测得,分别为2 211.59、1 621.92、407.16、244.29、62.34、39.39 V/m。

### 3) 同杆架设

同杆假设模型主要考虑10与35 kV水平排列,如图8所示,两相线间垂直距离应不小于2 m。

情况(a)为10与35 kV均带电,情况(b)为10 kV带



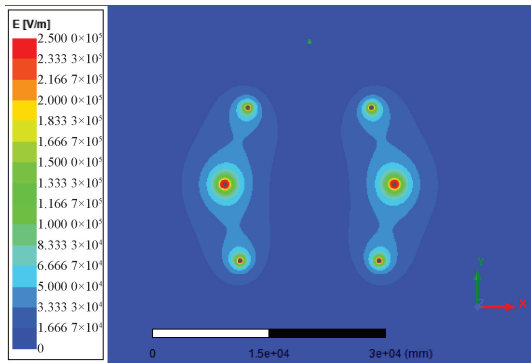


图7 500 kV同塔双回鼓型排列仿真模型

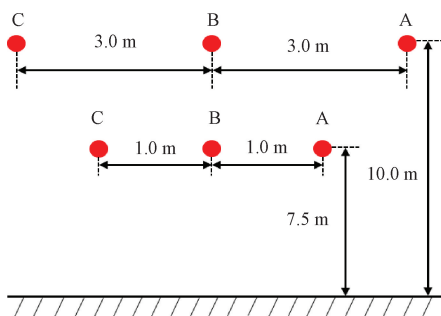


图8 10与35 kV同杆架设示意图

电、35 kV 不带电,情况(c)为 10 kV 不带电、35 kV 带电,为同时满足两者安全距离要求,测取两者安全线上的电场强度。情况(a)时的最小电场强度在 35 kV 安全线 T2 处附近测得为 276.44 V/m,情况(b)时的最小电场强度在 35 kV 安全线 T3 处测得为 144.83 V/m,情况(c)时的最小电场强度在 10 kV 安全线 T3 处测得为 117.69 V/m。

## 2.2 报警阈值设定

根据多模型仿真分析与式(6),防外破装置报警阈值设定如表3所示。

表3 多模型架空输电线路报警阈值设定

电压等级/kV	报警情况分析	感应电压/V	报警阈值/V
10	单回—正三角	1.223	0.188
	双回—鼓型	0.286	0.044
35	单回—正三角	2.120	0.326
	双回—鼓型	0.516	0.079
66	单回—正三角	2.809	0.432
	双回—鼓型	2.035	0.313
110	单回—正三角	3.083	0.474
	双回—鼓型	3.393	0.522
220	单回—正三角	3.535	0.543
	双回—鼓型	13.516	2.079
500	单回—正三角	4.145	0.637
	双回—鼓型	18.429	2.835
10、35	仅 10 kV/35 kV 带电—水平	0.980	0.150
	均带电—水平	2.303	0.354

## 3 装置软硬件设计

### 3.1 硬件结构设计

防外破装置系统架构如图9所示,由感知层测量端与应用层报警端组成。硬件基本结构包括主控制器模块、电源模块、无线通信模块、装置自检电路、声光报警模块、电场传感器模块、信号调理电路、报警阈值选择模块以及电池电压采集电路。经电压等级选择模块后,防外破装置实现对采集到的工频交流电场信号进行分压、滤波、整流、A/D转换以及无线传输,通过将处理后的信号与报警阈值比较,进而判断作业机械是否超出最小安全距离并发出声光报警。

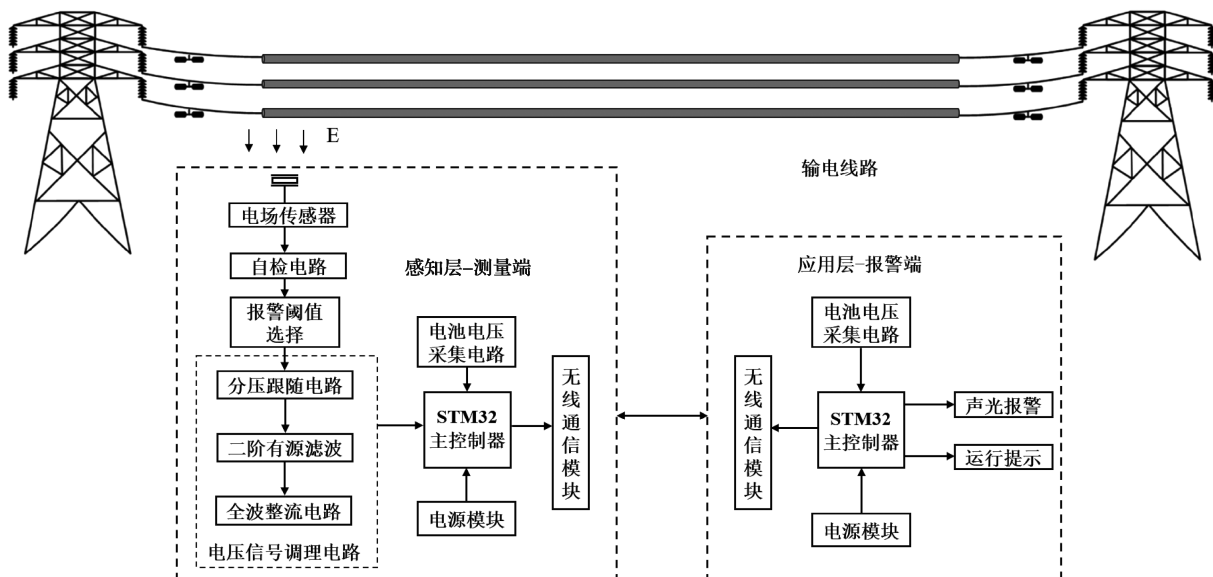


图9 防外破装置系统架构

信号调理电路如图 10 所示,主要包括  $R_1$  与  $R_2$  组成的 1:6.5 分压电路;  $D_1$  与  $D_2$  组成的双二极管隔离高压电路;电压跟随电路由 AD620 运算放大器组成,输入阻抗高达 10 G $\Omega$ ,具有高压摆率、高精度、低功耗、低噪声等优点,

能够有效实现信号放大与抑制干扰信号的作用,其增益系数  $G=1$ ;  $OP_2$  组成的二阶有源滤波电路,其滤波中心频率与线路电压频率相同;  $OP_3$  与  $OP_4$  组成的全波整流电路,将双极性正弦电压信号变为单极性。

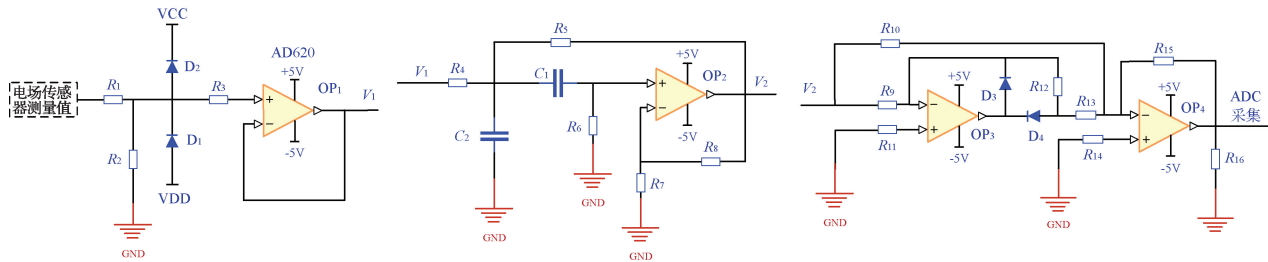


图 10 电压信号调理电路

主控制器采用 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F103,内部集成 12 位 ADC、16 位 AD/DA 转换器,成本低且拥有丰富的片上资源。无线通信模块采用 NRF24L01,封装体积小且功耗极低,采用 FSK 调制,通过 SPI 接口连接单片机,工作频段为 2.4~2.5 GHz,波长长,适合实际环境下的远距离传输。装置采用 12 V 锂电池供电,各模块供电范围包括  $\pm 3.3$ 、 $\pm 5$  V,考虑电源输出质量与转换效率,采用 DC-DC 低纹波降压芯片 XL2596S-ADJE1 与线性稳压芯片 TLV70033DCK 分别实现降压。报警蜂鸣器在考虑成本与工作环境温差较大的情况下,采用 DT9001-FL 语音芯片控制,适配  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  工作环境。为提高防外破装置电磁兼容性和 PCB 抗干扰能力,增强电路板稳定性和信号完整性,采取如下措施:PCB 走线采用  $45^{\circ}$  和  $135^{\circ}$  两种,避免信号反射与传输时延;晶振外壳接地处理,晶振下方避免走线,杜绝晶振谐波;PCB 闲置空间采用敷铜处理,避免电磁干扰。测量端与报警端电路板如图 11 所示。

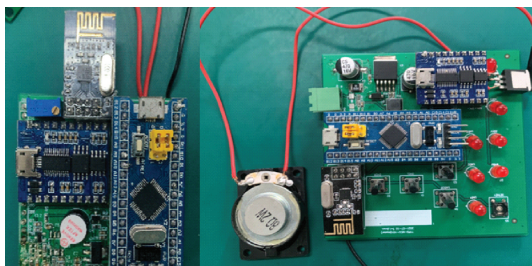


图 11 测量端与报警端 PCB 电路板

### 3.2 软件设计

为实现不同线路情况下的电压档位选择,报警阈值选择电路采用 CD4051 多路模拟开关,相当于一个单刀八掷开关,其静态电流低,工作温度适应性强,能够快速完成信号切换,通过禁止端 INH 使能控制 COM 公共端,通过三位译码端 A、B、C 选择通道号。报警阈值选择流程如图 12 所示,通过判断“按钮 2”按下次数选择各电压等级所对应的报警阈值,通过三路电平信号输入控制挡位选择。流程开

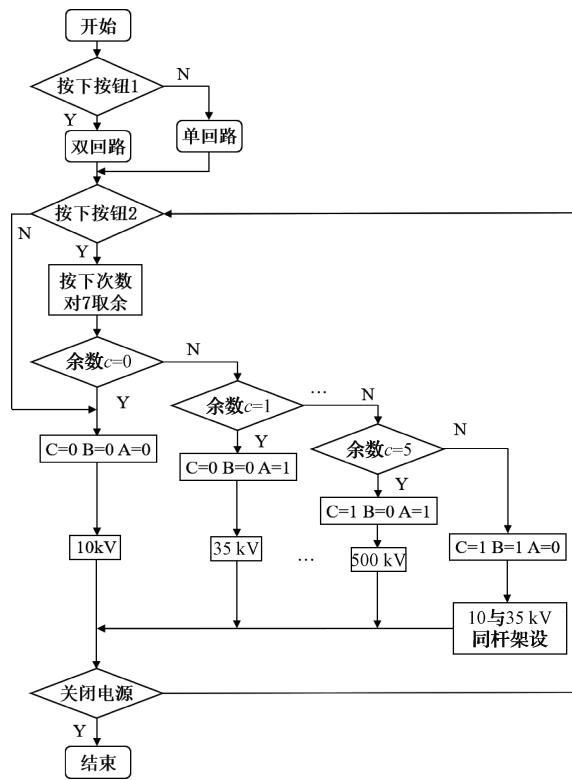


图 12 报警阈值选择流程

始后,选择单回路或双回路,主控制器根据对 7 取余后的值进行判断,初始状态和余数  $c=0$  时,报警电压等级为 10 kV; $c=1$  时,对应 35 kV,此时 A、B 对应低电平,A 为高电平,INH 为低电平,COM 端与输出通道 1 连接; $c=2$  时,对应 66 kV; $c=3$  时,对应 110 kV; $c=4$  时,对应 220 kV; $c=5$  时,对应 500 kV; $c=6$  时,对应 10 与 35 kV 同杆架设。

## 4 实验验证与数据分析

### 4.1 实验平台搭建

为验证防外破装置在高压环境下的工作性能,搭建 10 kV 三相单回水平模拟架空输电线路高压实验环境,实验平台示意如图 13 所示。

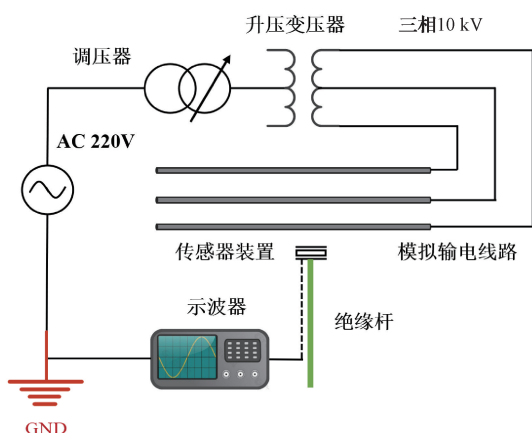


图 13 10 kV 模拟线路实验平台示意图

图 14 所示为实验平台现场，其中 220 V 工频交流 50 Hz 激励源为示波器供电并通过调压器控制升压变压器升至 10 kV，其相电压为 5.77 kV，峰值电压为 8.16 kV，作用于模拟线路以此获得高压电场环境，操作人员手持绝缘杆使传感器装置处于高压环境中进行感应电压测量并连接示波器，示波器用于观察装置输出的感应电压波形，验证传感器的实际工作效果。模拟线路采用铝芯绝缘线缆，导线横截面积 120 mm<sup>2</sup>，设置水平间距为 1 m，距离地面高度 5 m，与仿真参数保持一致<sup>[20]</sup>。

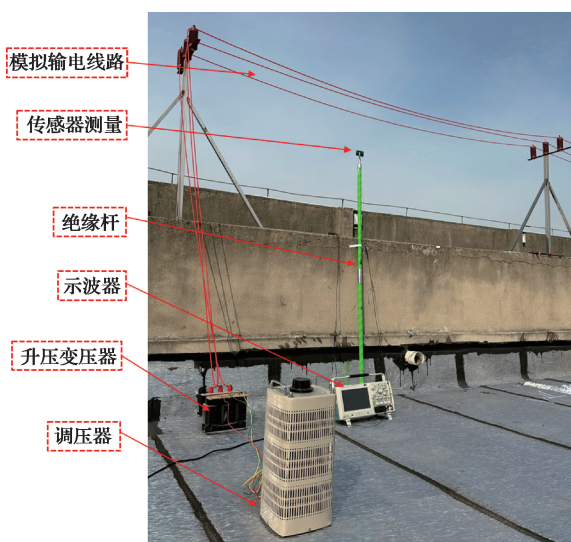


图 14 10 kV 模拟线路实验平台现场

#### 4.2 装置精准性测试

将防外破装置传感器输出端与示波器连接，验证其在高压环境下的实际测量状态。利用实验平台测试其距离模拟架空线路 A 相线垂直正下方、向外水平方向以及向内 45°方向上 0.2~1.2 m 的感应电压波形，每隔 0.2 m 记录 1 次。所测感应电压随距离变化曲线如图 15 所示，随着距离的增加感应电压不断减少，呈现反比例关系，其变化规律符合式(3)电场分布规律，表明防外破装置传感器

适用于高压环境作业机械设备近电预警。

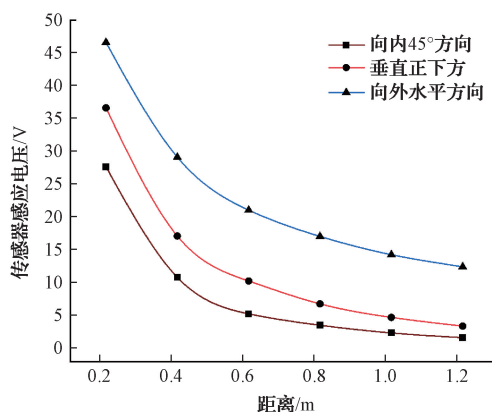


图 15 传感器感应电压和距离关系曲线

图 16 所示为距离 A 相线垂直下方不同距离时的示波器感应电压波形。由图 16 可知，所测感应电压波形稳定，呈现 50 Hz 正弦变化规律，但由于高压实验环境存在电力通信等其他高频电磁干扰，这也符合实际输电线路和变电站中电晕放电等产生的高频电磁噪声，导致波形并非光滑曲线，存在严重畸变现象，后续传感器接入电压信号调理电路进行低频滤波处理即可。

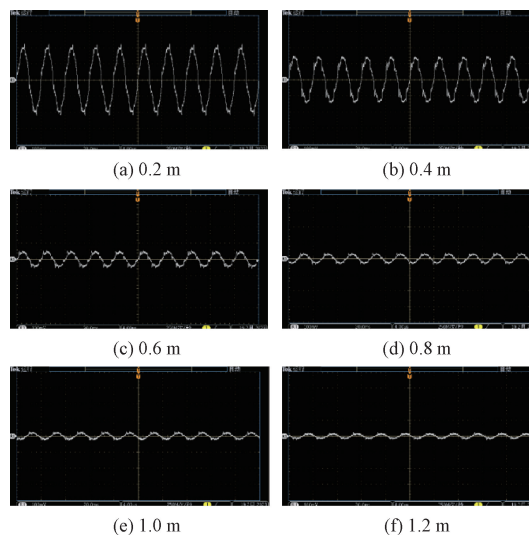


图 16 示波器感应电压波形

感应电压多次测量数据如表 4 所示，测量位置分别为 A、C 相线安全线 1 处的 T1、T2 测试点、B 相线安全线 2 处的 T3 测试点、T1 与 T2 圆弧 30°、45°、60°处的 T4、T5、T6 测试点以及 T2 与 T3 中点处的 T7 测试点。由于电路模块自身杂散电容影响，感应电压实际测量值小于理论值，即为负误差，可以达到提前预警效果，满足实际防外破工作预警要求。在安全线测试点上，感应电压测量误差在 0.012~0.028 V，最大平均相对误差在 C 相线 T1 处为 2.301%，最小平均相对误差在 A 相线 T7 处为 1.381%，均在 3% 以内，满足测量精度要求。

表4 10 kV 单回水平排列安全线测试点处感应电压实际测量数据

测量位置	第1次 测量/V	第2次 测量/V	第3次 测量/V	第4次 测量/V	第5次 测量/V	测量 均值/V	理论值/V	平均相对 误差/%
A(T1)	1.013	1.015	1.016	1.008	1.009	1.012 2	1.034	2.108
A(T2)	1.130	1.132	1.133	1.132	1.137	1.132 8	1.151	1.581
A(T4)	1.040	1.043	1.041	1.039	1.046	1.041 8	1.062	1.902
A(T5)	1.072	1.069	1.075	1.073	1.068	1.071 4	1.090	1.706
A(T6)	1.094	1.099	1.095	1.101	1.095	1.096 8	1.122	2.246
A(T7)	1.161	1.155	1.152	1.159	1.157	1.156 8	1.173	1.381
B(T3)	1.318	1.322	1.325	1.319	1.317	1.320 2	1.339	1.404
C(T1)	1.009	1.010	1.010	1.011	1.011	1.010 2	1.034	2.301
C(T2)	1.124	1.125	1.126	1.128	1.130	1.126 6	1.151	2.119
C(T4)	1.037	1.039	1.045	1.036	1.040	1.039 4	1.062	2.128
C(T5)	1.066	1.069	1.070	1.072	1.065	1.068 4	1.090	1.981
C(T6)	1.099	1.101	1.097	1.104	1.097	1.099 6	1.122	1.996
C(T7)	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159	1.159 0	1.173	1.586

### 4.3 装置线性度测试

线性度测试是为了确定传感器装置所测感应电压和电场之间的线性度,即确定两者之间的变化规律。可以通过改变模拟线路测试电压值以此改变电场强度,固定测量

距离,测试位置选取B相线垂直下方0.5 m处,通过调节变压器改变测试电压,幅值由1 kV逐步上升到10 kV,感应电压测量数据如表5所示。

利用线性回归分析方法对测试电压  $U_T$  与感应电压

表5 距离固定时感应电压实际测量数据

测试 电压	第1次 测量	第2次 测量	第3次 测量	第4次 测量	第5次 测量	第6次 测量	第7次 测量	第8次 测量	第9次 测量	第10次 测量	测量 均值
1	2.613	2.607	2.611	2.610	2.609	2.613	2.610	2.606	2.608	2.615	2.610
2	5.221	5.210	5.212	5.214	5.220	5.223	5.213	5.216	5.221	5.212	5.216
3	7.831	7.815	7.820	7.825	7.819	7.829	7.826	7.818	7.811	7.825	7.822
4	10.433	10.450	10.441	10.435	10.439	10.446	10.448	10.444	10.450	10.438	10.442
5	13.042	13.041	13.040	13.045	13.039	13.043	13.040	13.038	13.042	13.044	13.041
6	15.674	15.652	15.657	15.673	15.659	15.658	15.666	15.671	15.651	15.655	15.662
7	18.276	18.260	18.264	18.267	18.274	18.265	18.259	18.270	18.267	18.254	18.266
8	20.901	20.878	20.886	20.891	20.874	20.878	20.881	20.903	20.895	20.889	20.888
9	23.514	23.492	23.498	23.512	23.496	23.505	23.511	23.509	23.497	23.499	23.503
10	26.311	26.320	26.317	26.314	26.321	26.319	26.314	26.320	26.312	26.315	26.316

$U_i$  进行数据拟合,得到线性拟合曲线:

$$U_i = 2.62174U_T - 0.00756 \quad (7)$$

线性拟合曲线如图17所示。线性相关系数  $R = 0.9997 \approx 1$ ,当距离一定时,传感器装置实际所测感应电压与测试电压成正比,因此,传感器装置与电场强度有着良好的线性度。

### 4.4 现场报警测试

对本文所设计的防外破装置进行10 kV单回水平、66 kV单回“上字型”、110 kV单回水平、220 kV双回鼓型排列方式下的外力破坏隐患点现场报警测试,测试地点有无锡市锡山区新红变220 kV架空输电线路保护区内、国网浙江恒山1684线等。现场测试如图18所示。

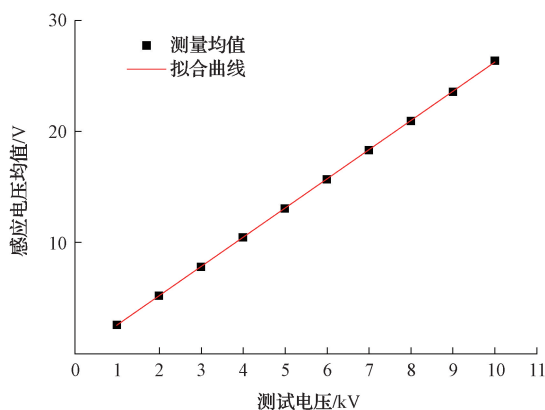


图17 线性拟合曲线





图 18 防外破装置现场报警测试

测量端放置于吊车吊臂顶端,报警端放置于作业机械驾驶室内。各电压等级测试 30 次,报警情况如表 6 所示,装置整体运行良好,能够及时发出预警信息,报警成功率为 100%,适用于多组态与多电压等级架空输电线路。

表 6 防外破装置现场报警情况

电压等级/kV	报警次数/测试次数	报警成功率/%
10	30/30	100
66	30/30	100
110	30/30	100
220	30/30	100

## 5 结 论

针对多组态与多电压等级架空输电线路设计了一种基于电磁感应原理的非接触式防外破装置。本文完成传感器结构改进与实物制作,避免空间电场畸变影响,提高传感器测量精度;根据相关规程确定线路最小安全距离并设定参数,进行常见电压等级下的不同排列方式、不同回路数的线路模型仿真与报警阈值设定;进行装置的电磁兼容与软硬件结构设计;搭建 10 kV 防外破装置高压实验环境进行性能测试,同时完成外力破坏隐患点现场报警测试。结果表明,所测感应电压变化规律符合电场分布规律,装置兼顾精准性与线性度需求,能够有效实现作业机械近电预警。装置可应用于输电线路及附近应急抢修施工、基建工程对线、改造工程拆线等工作现场、为运维检修或安监部门提供作业安全保护新途径,进一步升级实现人机交互和机械设备的组网联动,增加安全机制。但在实际设计运用过程中,装置仍存在一定的局限性,由于感应极板采集的信号为工频交流电场信号,无法测量恒定电磁场,因此不适用于直流高压输电线路;由于高频电磁干扰、输电线路附近的树木房屋等障碍物对交变电磁场的削弱作用以及各线路塔型参数不同,存在一定的测量误差,因此无法实现近电距离信息的准确获取。后需进一步研究,实现交直流一体化测量与近电距离实时反馈。

## 参 考 文 献

- [1] 韩卿. 新形势下输电线路防外破管理模式探索[J]. 通信电源技术, 2020, 37(1): 232-233.
- [2] 张勇, 周玉泉, 汪琪, 等. 输电线路防外破在线巡检系统设计[J]. 电工材料, 2020(4): 44-46, 49.
- [3] 陆新宇, 张庆, 马李锋, 等. 基于多源传感的输电线路防碰线预警方法及装置设计[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(24): 144-153.
- [4] 方春华, 陆杰炜, 董晓虎, 等. 基于 AD-Census 代价及目标检测的吊车防碰线技术[J]. 电子测量技术, 2022, 45(13): 141-145.
- [5] 孙建明, 许义, 朱先启, 等. 基于声阵列的智能监控系统及其在输电线路防外破中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2017, 15(6): 68-72.
- [6] 曹海文, 詹加舟, 刘晓, 等. 北斗定位在输电线路防外破监管系统中的设计与实现[J]. 中国高新技术, 2022(20): 84-85, 94.
- [7] 谢修成, 花国祥, 李鹏. 面向多组态线路的非接触式防外破装置研究[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(12): 61-66.
- [8] 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.
- [9] 胡堃, 陈美军, 徐韶卿, 等. 新型非接触式电参数测量方法的研究与实现[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(1): 101-109, 122.
- [10] WALCZAK K, SIKORSKI W. Non-contact high voltage measurement in the online partial discharge monitoring system[J]. Energies, 2021, 14(18): 5777.
- [11] 李岩松, 高利, 刘君. 基于光学传感的交直流混合场一体化测量实现[J]. 电测与仪表, 2023, 60(8): 150-156.
- [12] 陈胜硕, 胡杰祥, 李志, 等. 光学电压传感器温度响应特性分析与实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 169-178.
- [13] 白晓晨, 杨永坤, 荆光瑞. 基于紫外脉冲法的电力设备放电检测系统[J]. 科学技术创新, 2021(9): 61-63.
- [14] HABERMAN M A, SPINELLI E M. A noncontact voltage measurement system for power-line voltage waveforms [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 2790-2797.
- [15] ZHANG W B, YANG Y L, ZHAO J J, et al. Research on a non-contact multi-electrode voltage sensor and signal processing algorithm[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8573.
- [16] ANANE P, HUANG Q, AYIMBIRE P, et al. Non-contact measurement of traveling wave of overhead

- transmission line [J]. Measurement, 2021, 181: 109557.
- [17] 柏继云, 王亿勃, 程范贤. 110 kV“上”字型输电线路复合材料横担耐雷水平研究[J]. 四川电力技术, 2020, 43(5): 14-17.
- [18] 周丹红, 郭昆丽. 500 kV 交流输电线路下金属体尺寸对暂态电击水平的影响研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3): 118-123.
- [19] 茅路铠. 高压交流输电线路电场建模与实时监测系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [20] 肖杨, 高峰, 花国祥. 基于双目视觉的输电线路防外破系统设计[J]. 电子测量技术, 2023, 46(16): 1-9.

## 作者简介

花国祥(通信作者), 副教授, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为电力通信, 继电保护, 电力系统运维新技术。

E-mail: 20211249589@nuist.edu.cn

高峰, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为先进阻尼减振技术。

E-mail: 1610081@stu.neu.edu.cn

肖杨, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路检测与防外破、机器视觉。

E-mail: terminalxy@163.com