

# 高压近电预警用工频电场传感单元设计与分析

周年荣<sup>1,2</sup>, 方正云<sup>1</sup>, 唐立军<sup>1</sup>, 范良进<sup>3</sup>, 张文斌<sup>3\*</sup>

(1. 云南电网责任有限公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217;

2. 重庆大学电气工程学院, 中国重庆, 400044;

3. 昆明理工大学机电工程学院, 云南 昆明 650504;)

## Design and Analysis of Power Frequency Electric Field Sensor for High Voltage Near-Electricity Early Warning

Zhou Nianrong<sup>1,2</sup>, Fang Zhengyun<sup>1</sup>, Tang Lijun<sup>1</sup>, Fan Liangjin<sup>3</sup>, ZHANG Wenbin<sup>3\*</sup>

(1. Yunnan Power Grid Electric Power Research Institute of LLC, Kunming 650011, China;

2. School of Electrical Engineer, Chongqing University, Chongqing, 400044, China;

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China;)

**摘要:** 新型近电报警装置可识别出高压近电作业人员所处环境的安全等级, 减小电力运维人员的触电风险。平行板式工频电场器由于其传感单元体积小、成本低廉, 可广泛用于近电预警的电场测量。但由于平行极板存在的边缘效应, 测量时会引起电力线的畸变, 影响灵敏度、线性度和量程等性能参数。本文提出一种新型带等位环的 PCB 平板电容的交变电场传感单元结构, 通过仿真优化分析, 设计了带等位环的电场感应单元的结构参数。根据工频电场测量标准, 对传感单元进行了性能测试。结果表明: 等位环结构避免了极板的边缘效应, 最后通过合理配置积分采样电容, 使得感应传感单元的线性度可达 1.6025%、电压灵敏度系数达到 248 mV/(kV·m-1)。设计的电场传感器达到近电预警测量的要求

**关键词:** 等位环; 平板电容; 工频电场; 电场传感单元

**Abstract:** The novel near-electric alarm device can identify the safety level of the high-voltage near-electric working personnel environment, and reduce the electric shock risk of the electric power operation and maintenance personnel. The power frequency electric field device based on parallel plates can be widely used for electric field measurement of near-electrical early warning due to its small size and low cost. However, due to the edge effect of the inductive plate capacitance, the distortion of the power line is caused during the measurement, and the performance parameters such as sensitivity, linearity and range are affected. In this paper, an alternating electric field sensor structure of a PCB plate capacitor with an equipotential ring is proposed. The structural parameters of the electric field sensing unit with an equipotential ring are optimized and analyzed by simulation. The sensor was tested for performance according to the power frequency electric field measurement standard. The results show that the equipotential ring structure avoids the edge effect of the plate. Finally, by properly arranging the integral sampling capacitor, the linearity of the inductive sensing unit can reach 1.6025% and the voltage sensitivity coefficient reaches 248 mV/(kV/m). The designed electric field sensor meets the requirements for near-electrical early warning measurements.

**Key words:** Equipotential ring; plate capacitor; power frequency electric field; electric field measurement unit

## 0 引言

在电力系统中, 不管是对电力系统的设备运行状态的检测, 还是在电力作业中为作业人员提供近电预警都离不开对电场的测量。目前对工频电场的测量方法主要分为光学式的电场测量法和电学原理的电场测量法两大类。光学式的电场传感器有响应速度快, 安全性高等优点<sup>[1]</sup>, 但其感应单元所需的晶体材料比较特殊。电学原理的传感器根据处于电

场中的金属极板会产生感应电荷的特性<sup>[2,3]</sup>, 运用两极板间引起的感应电流或感应电压对空间的电场进行测量<sup>[4,5]</sup>, 其测量单元有球形<sup>[6]</sup>、MEMS 结构<sup>[7,8]</sup>、圆柱型<sup>[9]</sup>、平行板型<sup>[10,11]</sup>等。由于球型等形状的电场传感单元设计工艺比较复杂, 加工比较困难, 且空间占用大, 不利于集成于便携式电场测量设备中, 在输变电现场作业预警方面无法应用。平行板结构的电场传感单元由于结构简单, 制作方便, 体积小

便于集成化而运用得较多<sup>[10,11]</sup>。限制平行板结构的电场传感单元性能的主要因素为其不稳定的边缘电容而引起的边缘效应，因此，为了减小平行极板式工频电场传感边缘效应对工频电场畸变的影响，本文提出一种基于等位环结构的平行板工频电场传感单元，在仿真的基础上对平行极板的直径、极板间距以及等位宽度对畸变系统的影响，并实验测试了这种新型结构对提高工频电场传感器的线性度及灵敏度的作用。

## 1 传感单元测量原理

由高斯定理可知，在电场  $E$  中的金属极板上会有感应电荷的产生，感应电荷的面密度为  $\sigma$ ，其中  $\epsilon$  为极板间介质的介电常数。被测电场强度的变化引起感应电荷的数量的改变，此关系可以表示为

$$Q(t) = \int \sigma dS = \epsilon E(t) S \quad (1)$$

式 (1) 中， $Q(t)$  为极板的感应电荷量； $E(t)$  为被测电场强度； $S$  为感应极板的有效面积<sup>[12,13]</sup>。

感应单元的结构原理如图 1 所示，上下极板分别与取样电容  $C_s$  的两端相连，极板的感应电荷在取样电容  $C_s$  上产生的电压信号  $U(t)$  作为输出信号，其关系为

$$U(t) = \frac{kQ(t)}{C_x + C_s} \quad (2)$$

$C_x$  为传感单元固有电容， $k$  为修正系数，其值与传感单元的结构有关<sup>[14]</sup>，将式 (1) 代入式 (2) 为

$$U(t) = \frac{k\epsilon E(t) S}{C_x + C_s} \quad (3)$$

通过对采样电容  $C_s$  两端的电压  $U(t)$  进行测量便可以得到该测量位置的电场强度<sup>[15]</sup>。式 (3) 建立了传感单元输出电压和被检测电场强度之间的关系，通过对传感单元的输出电压信号的处理并进行运算就可以获得电场强度的信息。

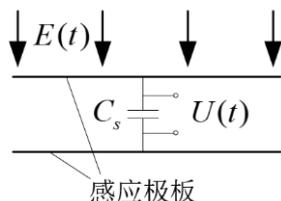


图 1 感应单元结构原理图

## 2 传感单元结构与参数设计

电场感应单元结构的设计如图 2 所示，其由上极板、下极板和等位环三部分组成。由于平行板电容间存在边缘电容，在外电场的干扰下电容边缘电荷聚集的数量很难保证稳定，其电容不能保持稳定会给传感器的测量带来误差，使传感器的输出不稳、灵敏度降低、输出特性产生非线性。因此，在设计电场感应单元时为减小边缘效应的影响，采用等位环的结构以消除两极板间的边缘效应。这种结构能使上极板边缘电力线平直，上下两个极板的电场基本均匀，而发散的边缘电场发生在等位环外周，故不影响传感单元两电极间的电场，这样以保证传感器测量的准确性。

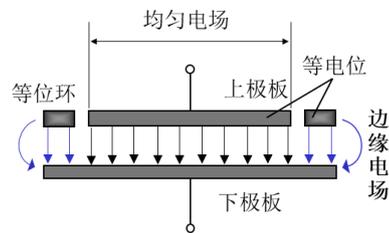


图 2 带等位环的电场感应单元结构图

电场感应单元用 PCB 印制电路板制作，利用一对圆铜盘作为平行板，中间的绝缘材料为环氧树脂，这样的制作工艺简单，成本低，能够保证各单元较好的一致性和稳定性。根据工频电场测量标准 (GBT12720—91)，对电场感应单元的结构参数对电场强度的影响运用 COMSOL 仿真软件进行建模仿真分析。在工频电场  $E$  中分别改变电场感应单元的感应极板半径  $r$  和间距  $d$  进行仿真，得到感应极板上的电场强度值  $E'_{\max}$  与原电场强度  $E$  进行对比，

利用畸变系数  $\gamma = (E'_{\max} - E) / E$  表征该结构参数对原电场强度的影响程度，其仿真结果如表 1、表 2 所示。

如图 3 所示，利用感应极板上为  $E' = 0.05E$  的电场强度等值线，确定不同半径的传感单元的等位环宽度  $k$ ，此等位环可以排除 94% 的畸变电场的影响。通过仿真得到不同半径的传感单元的等位环的宽度，结果如表 3 所示，通过 MATLAB 曲线拟合其关系为：

$$k = 8.35r^{-0.3584} \quad (4)$$

表 1 中, 不同半径下的传感单元的电场畸变系数变化小, 说明感应极板面积的变化对感应电场强度的畸变程度的影响较小, 但是为了便携性, 传感单元选择较小的半径。从表 2 中可知, 随着感应极板间距的增加, 传感单元的电场畸变系数也增加, 感应极板间距的改变直接影响感应电场强度的畸变程度, 因此在设计传感单元的感应极板间距时应尽量选择较小的极板间距。在生产制作时, 根据表 3 中仿真得到的数据与工厂工艺水平参数制作 1.6mm 厚的 PCB 的传感单元, 实物如图 4 所示。

表 1 感应极板半径  $r$  对畸变系数  $\gamma$  的影响

半径 $r$ /mm	8	14	20	26	32	38	44
畸变系数 $\gamma$	0.875	0.901	0.922	0.854	0.816	0.897	0.917

表 2 感应极板间距  $d$  对畸变系数  $\gamma$  的影响

极板间距 $d$ /mm	1	1.6	2.2	2.8	3.4	4
畸变系数 $\gamma$	0.682	0.959	1.183	1.246	1.286	1.434

表 3 感应极板的半径  $r$  与等位环宽度  $k$  的关系

编号	1	2	3	4	5	6	7
半径 $r$ /mm	8	10	12	14	16	18	20
宽度 $k$ /mm	3.9	3.8	3.4	3.2	3.05	2.95	2.9

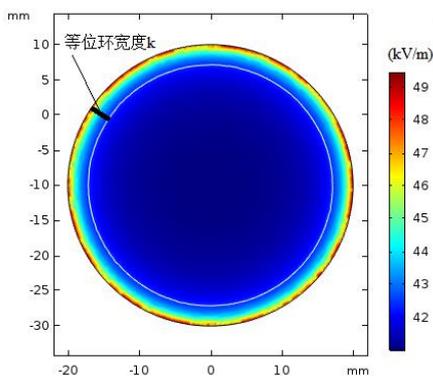


图 3 传感单元的等位环的宽度确定

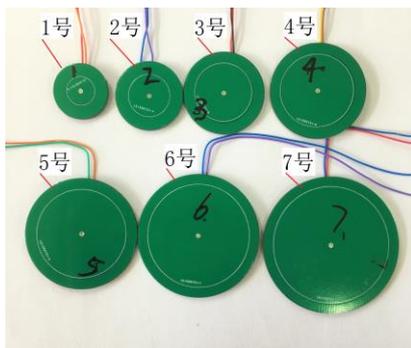


图 4 传感单元实物图

### 3 不同参数的传感单元测试试验

#### 3.1 传感单元固有电容的影响

根据 (GBT12720—91) 工频电场测量标准, 搭建工频电场测试平台。测试平台由调压器、高压实验变压器、平行板装置三部分组成, 实验平台如图 5 所示。在平行板装置的上层和下层之间产生单相均匀工频电场, 将没有接采样电容的传感单元放在平行板装置的中心位置。通过示波器进行读取传感单元的输出信号的峰峰值; 通过调压器调整电场强度, 并记录变压器的输出电压值; 完成调压后, 读取传感单元的输出值; 测试完所有的传感单元。各单元的试验数据和拟合结果如图 6 所示, 其试验结果分析如表 4 所示。

从图 6 可以看出各传感单元的测量值都具有良好的线性关系, 在场强超过 200 kV/m 后各传感单元都还没有达到饱和状态, 最优的 5 号传感单元线性度达到 1.6025%, 有较大的灵敏度系数。从表 4 中可以看出随着传感单元的感应面积的增加, 1 到 5 号传感单元的灵敏度系数不断增大, 最大达到 248 mV/(kV m<sup>-1</sup>), 而 6、7 号传感单元的灵敏度下降, 其原因还在研究中。



图 5 测试试验场景图

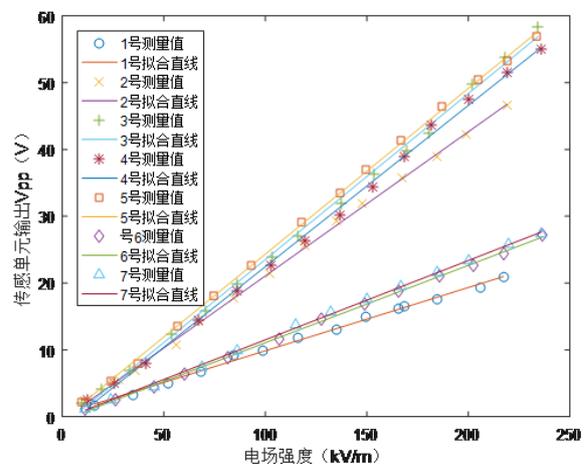


图 6 各传感单元试验结果拟合分析

表4 各传感单元测试结果分析

单元编号	固有电容 $C_s$ (pF)	线性度	灵敏度系数 ( $V/kV m^{-1}$ )
1号	1.38	4.3507%	0.098
2号	3.0072	1.81%	0.216
3号	5.786	2.8784%	0.24
4号	9.1249	3.0948%	0.241
5号	13.0185	1.6025%	0.248
6号	17.8376	1.6091%	0.116
7号	22.8757	1.6375%	0.121

### 3.2 采样电容的配置

在没有接采样电容的传感单元进行了工频电场测试试验后,选择性能较好的5号传感单元连接不同的采样电容进行测试分析。测试过程与工频电场测试试验相同。试验测试结果如表5所示。

从表5中可以看出,在接不同的采样电容的时候,传感单元具有不同的灵敏度系数,均有一定的线性度。当采样电容比较小时,传感单元的灵敏度系数较大,但是其输出信号过大,无法进行信号处理,不利于电场测量;在200kV/m的高场强下输出信号波形畸变严重,传感单元的测量性能不佳。而在较大的采样电容下,传感单元的灵敏度系数变小,输出信号也随之减小,其输出信号波形的畸变也较小。因此,根据试验情况和设计需要等综合分析,实际的采样电容  $C_s$  值的选择为3.3 nF。

表5 接不同采样电容的5号单元的测试结果

序号	采样电容 $C_s$ (nF)	线性度	灵敏度系数 ( $V/kV m^{-1}$ )	$V_{\text{峰值}}$  E =200kV/m (V) <sup>注1</sup>
5-0	0	1.6025%	0.248	49.159
5-1	0.33	2.2101%	0.087	17.1703
5-2	0.68	1.0458%	0.057	11.6582
5-3	1	0.8837%	0.054	10.913
5-4	2.2	1.8399%	0.042	8.5471
5-5	3.3	0.3586%	0.030	6.149
5-6	4.7	0.7776%	0.028	5.6982

注1: 为传感单元在场强200kV/m时的输出信号的峰峰值。

## 4 结论

本文利用一种新型的等位环结构解决了平板电容式电场传感单元的感应极板存在边缘效应的问题,且对设计制作的传感单元进行了电场标定试验研究,仿真及标定测试实验结果表明:

1) 在两感应极板的间距不变时,感应极板面积的增大对极板上的电场畸变影响不大,畸变系数维持在0.9左右。在感应极板的感应面积一定时,极板间的间距对电场的畸变影响较大,随着间距的增加,极板上电场的畸变系数也增大。

2) 为屏蔽平板电容边缘94%畸变电场的影响,等位环的宽度随感应极板的半径的增加而减小而趋于平稳,其关系可拟合为  $k = 8.35r^{-0.3584}$ 。

3) 采样电容对平板电容传感单元的线性度与灵敏度系数的影响不可忽略,采样电容的增大使传感单元的灵敏度系数减小,相对较大的采样电容具有较好的线性度。

4) 感应极板半径为16mm,等位环宽度为3.05mm,极板间距是1.6mm结构参数的5号传感单元在采用3.3nF的采样电容时,其线性度可达0.3586%,灵敏度系数为30mV/(kV  $m^{-1}$ );在场强为200kV/m时,其输出信号的峰峰值达到6.149V。

## 参考文献

- [1] 李长胜,崔翔. 光学电场传感器研究综述[J]. 电气应用, 2008, 27(16): 13-18.
- [2] 蒋国雄,杨建中. 工频电场测量和一种新型测量探头的研究[J]. 高压技术, 1985(04): 1-5.
- [3] 牛犇,曾嵘,李欢,等. 无电极型工频电场传感器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 101-107.
- [4] 胡泽文. 工频电场测量方法和传感器的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [5] 聂鹏飞,崔勇,袁海文,等. 一种基于差分传导电流原理的工频电场传感器[J]. 测控技术, 2015, 34(1): 1-3, 7.
- [6] 胡平. 球型电场传感器测量系统的研究及应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [7] 张星,白强,夏善红,等. 一种小型三维电场传感器[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1433-1436.
- [8] 顾植彬,杨鹏飞,彭春荣,等. MEMS结构的带电作业电场测量预警系统[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(4): 111-113, 120.
- [9] 刘聪汉,何为,汪金刚,等. 便携式工频电场测量装置的设计[J]. 高压电器, 2012, 48(3): 57-62.
- [10] 秦睿,杨照光,安亮亮,等. 基于平行板传感器设计的高压电场测量安全警示仪[J]. 电气应用, 2016, 35(19): 72-78.
- [11] 汪金刚,林伟,李健,等. 电容式交变电场传感器与工频电场检测试验研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 21-23, 26.
- [12] Misakian, M.; Fulcomer, P.M.. Measurement of Nonuniform Power Frequency Electric Fields[J]. Electrical Insulation, IEEE

Transactions on, 1983, EI-18(6):657-661.

- [13] Nogi Y, Suzuki K, Ohkuma Y. Measurement of electric fields and estimation of dielectric susceptibility[J]. American Journal of Physics, 2013, 81(5):359-365.
- [14] 杨蔚, 刘玮, 赵强等. 电力巡线无人机机载电磁场检测系统设计[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2017, 36(1):76-79.
- [15] Ohkuma Y, Ikeyama T, Nogi Y. Double-sensor method for detection of oscillating electric field[J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(4):1225.

#### 作者简介:

第一作者: 周年荣 (1974-), 性别: 男, 学历: 硕士研究生, 职称: 高级工程师, 主要研究方向: 电网自动化检测及测试通信及信息技术等工作。zhouznr@163.com

第二作者: 方正云 (1979-), 性别: 男, 学历: 硕士研究生, 职称: 高级工程师, 主要研究方向: 从事智能电网、电力信息化、电力作业安全防护技术研究工作。57592715@qq.com

第三作者: 唐立军 (1985-), 性别: 男, 学历: 硕士研究生, 职称: 高级工程师, 主要研究方向: 从事电网自动化检测及测试、多源信息融合技术研究。tljun@foxmail.com

第四作者: 范良进 (1993-), 性别: 男, 学历: 硕士研究生, 主要研究方向: 嵌入式系统、输变电周围电场环境检测。liangjinfan@foxmail.com

\*通讯作者: 张文斌 (1976-), 男, 毕业于哈尔滨工业大学获工学博士学位, 现任昆明理工大学机电学院副教授。主要研究方向: 测控技术及仪器, 智能传感器。zwbst@126.com, 电话: 15308859327。