

套球壳型非接触式交流验电装置研究

杨鹏飞^① 闻小龙^{*②} 倪晓明^① 彭春荣^③

^①(北京信息科技大学理学院 北京 100192)

^②(北京科技大学数理学院 北京 100083)

^③(中国科学院空天信息创新研究院传感技术国家重点实验室 北京 100194)

摘要: 该文提出一种基于套球壳型电场探头的非接触式交流验电装置。套球壳型结构类似差分结构,可消除共模干扰噪声的影响。建立套球壳型结构的电场分布理论模型,得到外球壳表面的感应电荷密度和电场探头的灵敏度表达式。提出电场探头的等效电路模型,并设计了接口电路,最终成功研制出非接触式交流验电装置样机。测试结果表明:已研制样机的电压输出与施加电场之间有良好的线性关系,线性度达到0.66%,并且测试结果与计算结果有较好的一致性;当样机在0~45°范围内转动时,其输出的电压值仅降低了4.0%,说明验电装置的小角度旋转基本上不影响验电的准确性;越接近输电线路,样机输出的电压值的增大速度越快,阈值易于识别,说明越容易验电。

关键词: 非接触式验电装置; 电场探头; 套球壳型结构

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)06-1637-07

DOI: [10.11999/JEIT200286](https://doi.org/10.11999/JEIT200286)

A Novel Non-contact AC Voltage Detector Based on Concentric Double-layer Spherical Shell Structure

YANG Pengfei^① WEN Xiaolong^② NI Xiaoming^① PENG Chunrong^③

^①(School of Applied Science, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

^②(School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

^③(State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100194, China)

Abstract: A novel non-contact AC voltage detector based on the electric field probe of concentric double-layer spherical shell structure is presented. The concentric double-layer spherical shell structure is similar to the differential structure, which can eliminate the influence of common mode interference noise. The theoretical model of the electric field distribution of the double-layer spherical shell structure is established, and the induced charge density of the outer spherical shell surface is analyzed. Then the sensitivity expression of the electric field probe is obtained. Furthermore, the equivalent circuit model of the electric field probe is proposed and the interface circuit is designed. Finally, a prototype of the not-contact AC voltage detector is successfully developed. The test results show that there is a good linear relationship between the output of the prototype and the applied electric field, with a linearity of 0.66%, and the test results are in good agreement with the calculated results. Additionally, when the prototype rotates within the range of 0~45°, the output voltage is only reduced by a maximum of 4.0%, which indicates that the small angle rotation of the AC voltage detector does not affect the accuracy of electricity testing. Besides, the closer to the transmission line, the faster the output voltage of the prototype increases, and the threshold is easy to identify, suggesting that it is easier to verify the electricity.

Key words: Non-contact voltage detector; Electric field probe; Concentric double-layer spherical shell structure

收稿日期: 2020-04-21; 改回日期: 2020-11-12; 网络出版: 2020-11-20

*通信作者: 闻小龙 xiaolongwen@ustb.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFF01010800)

Foundation Item: The National Key R&D Program of China (2018YFF01010800)

1 引言

高压验电器是检测架空线路、电缆线路、高压用电设备是否存在电压的专用电力安全工具^[1]。近年来,随着我国电力行业的迅速发展,高压验电器的需求量与日俱增。目前,已商业化的10 kV及以上电压等级的验电器主要为电容式验电器,操作时需直接接触裸露的金属导线,通过声光报警指示线路是否带电^[2-6]。虽然电容式验电器操作简单、携带方便,但是它必须与高压线路直接接触才能使用,因此仍然存在安全隐患。另外,电容式验电器也无法用于配电网带有绝缘包覆的线路验电。

非接触式验电器是一类新型的验电器,无需与带电线路接触,理论上不存在安全隐患,也可以用于带有绝缘包覆的线路验电。非接触式验电器主要分为电场感应型和电晕放电型两种,通过检测高压输电线路附近的电场分布情况或者电晕放电的相关参量来实现输电线路的验电操作^[7-11]。电晕放电型验电器基于紫外线检测原理,仅适用于发生明显电晕放电的场景,对于电晕放电弱、不存在局部放电或电晕放电的情况,验电器则无法有效工作^[7]。电场感应型验电器通过其内部的电场探头检测高压输电线路附近电场,当电场值超过阈值时,触发产生声光报警信号。目前已报道的电场感应型交流验电器的电场探头大多采用平行板电容结构^[12-15],部分采用MEMS电场敏感器件^[16,17],由于平行板电容结构和MEMS电场敏感器件主要用于测量1维电场,验电器在实际操作过程中如果其电场探头的探测方向与被测电场方向存在一定的夹角,那么测试得到的电场值则小于被测电场值,可能导致验电器出现漏报问题,引起事故发生。

为此,本文提出了一种新型非接触式交流验电装置,采用套球壳型电场探头结构,因而在小角度范围内转动时电场测量结果仍然较为准确,降低了由于转动引起电场测量误差而产生的误报问题。

2 套球壳型电场探头设计

球形探头常用于工频电场测量,采用不同的球形分割方式,可以分别得到1维、2维和3维球形探头^[18,19]。1维球形探头由两个空心半球壳与测量电容组成,两空心半球壳为球形探头的两个电极,通过绝缘物连接在一起。1维球形电场探头类似于平行板电容结构探头,只能测量电场的1个分量,因此并不适合应用于验电装置。2维和3维球形探头指将球体分别对称分割成4个电极和6个电极,彼此之间互相绝缘并且两两相对,且每对电极之间的方向又互相垂直。2维探头尤其3维探头可进一步提高电

场测量的准确性,然而也增加了信号处理电路的复杂性、成本、体积和功耗。针对小体积、低功耗、低成本、小角度范围内转动不影响电场测量准确性的非接触式交流验电装置的应用需求,在球形探头基础上,本文提出了新颖的套球壳型电场探头结构。

套球壳型电场探头主要由内球壳A、外球壳B和介电常数为 ϵ 的填充电介质C,3部分组成,结构示意图如图1所示。内球壳A和外球壳B相当于两个电极,材质为不锈钢,内球壳的外径为 a ,外球壳的内径为 b 。外球壳B有开孔,既可以在电场环境下使其内部存在电场,又能引出与内球壳A电连接的导线。

当套球壳型电场探头置于被测电场 E_0 中时,由于存在开孔,外球壳B无法完全屏蔽电场 E_0 ,所以外球壳B内部存在电场 E' ,则内球壳A与外球壳B之间产生电势差 V_{ba} 为

$$V_{ba} = V_b - V_a = \int_a^b E' dr \quad (1)$$

通过测量 V_{ba} 可得到被测电场大小。下面对套球壳型电场探头的测量原理进行详细分析。

3 套球壳型电场探头测量原理

3.1 电场分布理论模型

为了便于分析,假设套球壳型电场探头的外球壳是一个完整封闭的球体。设球形坐标系的原点在内外球壳的球心, z 轴的正向与 E_0 的方向一致,即 $E_0 = E_0 e_z$,如图2所示。探头外球壳在电场作用下,其上下表面产生等量异号的感应电荷。球壳外任何一点产生的电场强度等于 E_0 加上所有感应电荷产生的电场。由于感应电荷的分布以 z 轴对称,所以球壳外的总电场分布也以 z 轴对称,或者说与方向角 φ 无关。这样可以利用式(2)计算球壳外的电位函数^[20]。

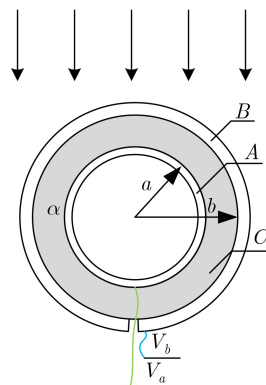


图1 套球壳型电场探头结构示意图

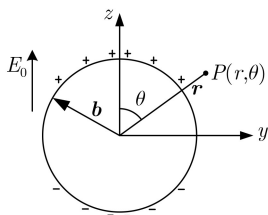


图2 套球壳型电场探头电荷分布示意图

$$\phi(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n r^n P_n(\cos \theta) + \sum_{n=0}^{\infty} B_n r^{-(n+1)} P_n(\cos \theta) \quad (2)$$

式中, A_n, B_n 为待定数; r 为原点到 P 点的距离; $P_n(\cos \theta)$ 为勒让德多项式, θ 为原点到 P 点的连线与正 z 轴之间的夹角。

边界条件:

(1) 假设外球壳表面的电位为 ϕ_0 , 则

$$\left. \begin{array}{l} r = b \\ \phi = \phi_0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

(2) 外球壳感应电荷所产生的电场随着 r 的增加而减弱, 在 $r \rightarrow \infty$ 处减弱至零, 那里的电场等于 E_0 , 用电位函数表示为

$$\left. \begin{array}{l} r \rightarrow \infty \\ \phi = \phi_0 - E_0 z = \phi_0 - E_0 r \cos \theta \end{array} \right\} \quad (4)$$

将上述的边界条件式(3)和式(4)代入式(2)可得电场探头球壳外的电位函数为

$$\phi(r, \theta) = \phi_0 - E_0 \left(1 - \frac{b^3}{r^3} \right) r \cos \theta, \quad r \geq b \quad (5)$$

球壳外的每一点电场强度可通过 $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ 计算, 得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r, \theta) = & E_0 \left(1 + \frac{2b^3}{r^3} \right) \cos \theta \mathbf{e}_r \\ & + E_0 \left(-1 + \frac{b^3}{r^3} \right) \sin \theta \mathbf{e}_\theta \end{aligned} \quad (6)$$

将 $r = b$ 代入式(6), 可就得电场探头外球壳表面的电场分布为

$$\mathbf{E}(b, \theta) = 3E_0 \cos \theta \mathbf{e}_r \quad (7)$$

根据式(5)和式(6)可求得电场探头外球壳表面的感应电荷面密度 ρ_s 。依据导体与介质分界面上的边界条件, 当 $r = b$ 时外球壳表面的感应电荷面密度为

$$\rho_s = D_n = \varepsilon_0 E_n = \varepsilon_0 E_r = 3\varepsilon_0 E_0 \cos \theta \quad (8)$$

式中, ε_0 为真空中的介电常数。式(8)表面感应电荷分布只是 θ 的函数。

3.2 灵敏度分析

由于外球壳开孔较小, 套球壳型电场探头的内球壳与外球壳之间的电容 C_{ab} 可近似表示为^[6]

$$C_{ab} \approx \frac{4\pi\varepsilon ab}{b-a} \quad (9)$$

假设 z 轴穿过外球壳开孔中心, z 轴与开孔某一侧的夹角为 θ_1 , 外球壳的厚度为 Δb , 外球壳的感应电荷面密度与完备球壳的感应电荷面密度相同, 则外球壳的感应电荷总量 Q 可表示为

$$Q = \int_s \rho_s ds = \int_{\theta=\theta_1}^{\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \rho_s (b + \Delta b)^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (10)$$

将式(8)代入式(10), 可得

$$Q = -3\pi\varepsilon_0 E_0 (b + \Delta b)^2 \sin^2 \theta_1 \quad (11)$$

由于外球壳为孤立导体, 根据静电感应现象, 在外电场作用下, 外球壳的内表面和外表面出现等量的异号电荷, 因此套球壳型电场探头内球壳 A 与外球壳 B 之间产生的电势差 V_{ba} 可表示为

$$V_{ba} = \frac{-Q}{C_{ab}} = \frac{3\pi\varepsilon_0 E_0 (b + \Delta b)^2 \sin^2 \theta_1 (b - a)}{4\pi\varepsilon ab} \quad (12)$$

对于外球壳 B , 其厚度 Δb 远远小于内径 b , 即 $\Delta b \ll b$, 电势差 V_{ba} 可近似表示为

$$V_{ba} \approx \frac{3\varepsilon_0 E_0 b (b - a) \sin^2 \theta_1}{4\varepsilon a} \quad (13)$$

式(13)表明, 套球壳型电场探头输出的电压 V_{ba} 与被测电场 E_0 之间呈线性关系。

考虑到套球壳型电场探头主要应用于测量工频电场, 则被测电场可表示为 $E_0(t) = \sqrt{2}E_0 \sin(\omega t)$, 代入式(13), 得到电场探头输出电压的瞬时值 $V_{ba}(t)$ 为

$$V_{ba}(t) \approx \frac{3\sqrt{2}\varepsilon_0 E_0 b (b - a) \sin^2 \theta_1}{4\varepsilon a} \sin(\omega t) \quad (14)$$

因此, 套球壳型电场探头的灵敏度 S_E 可表示为

$$S_E = \frac{V_{ba_rms}}{E_0_rms} = \frac{3\varepsilon_0 b (b - a) \sin^2 \theta_1}{4\varepsilon a} \quad (15)$$

式(15)表明, 在外球壳厚度 Δb 一定的条件下, 套球壳型电场探头的灵敏度 S_E 与外球壳内径 b 、内球壳外径 a 、填充电介质、开孔尺寸有关, 可通过减小内球壳外径、增加外球壳内径、改变填充电介质的绝缘度以及增大开孔尺寸提高电场探头的灵敏度。

4 探头等效电路模型及接口电路

忽略连接导线等效电阻和等效电容的影响, 套球壳型电场探头的等效电路如图3所示。在电场作用下, 套球壳型电场探头的电极上产生两路差分浮动电势 V_a 和 V_b , 为了便于测量电势差 V_{ba} , 需要将两路差分浮动电势转换成一路电压输出, 因此套球壳型电场探头的接口电路主要为一个差分放大电

路, 其中 R_{a1}, R_{b1} 为限流电阻, R_{a2}, R_{b2} 为直流偏置电阻。输出电压 V_{out} 可表示为

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_2} \frac{R_{a2} + R_{b2}}{\frac{1}{j\omega C_{ab}} + R_{a1} + R_{a2} + R_{b1} + R_{b2}} V_{ba} \quad (16)$$

则输出电压有效值 V_{out_rms} 为

$$V_{out_rms} = \frac{R_1}{R_2} \frac{\omega C_{ab} (R_{a2} + R_{b2})}{\sqrt{1 + [\omega C_{ab} (R_{a1} + R_{a2} + R_{b1} + R_{b2})]^2}} V_{ba_rms} \quad (17)$$

由式(15)和式(17)可得到输出电压有效值 V_{out_rms} 与被测电场有效值 E_{0_rms} 之间的关系。

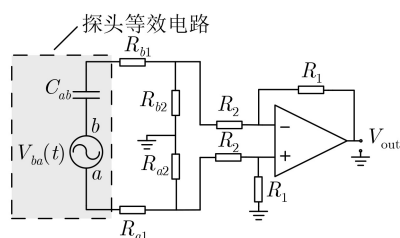


图3 套球壳型电场探头等效电路模型及接口电路

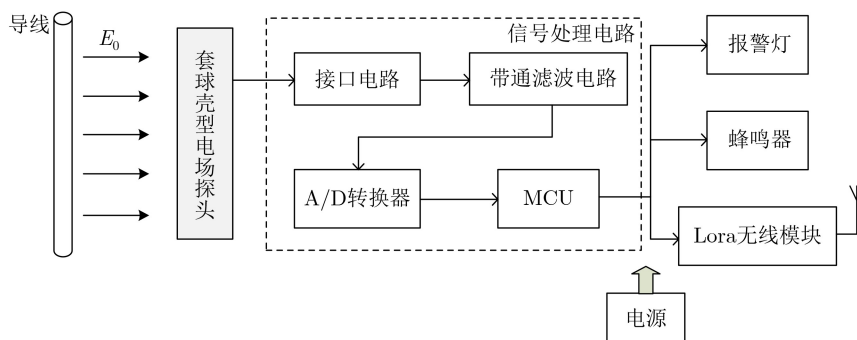
5 试验装置及测试结果分析

5.1 非接触式交流验电装置样机

套球壳型非接触式交流验电装置样机的结构框图及实物图如图4所示, 主要由套球壳型电场探头、接口电路、带通滤波电路、A/D转换器、微控制单元(Micro Control Unit, MCU)、报警灯、蜂鸣器、Lora(Long Range)无线模块、电源等部分组成。套球壳型电场探头用于探测输电导线或带电体的电场大小, 接口电路将双路差分浮动电势转换成一路电压输出, 带通滤波电路提取待测的工频信号, A/D转换器采集交流模拟信号后转换成数字信号在MCU中进行电场值计算和阈值比较, 当被测电场值大于或等于设定阈值时, 触发蜂鸣器和报警灯发出声光信号。为了模拟实际的使用环境, 避免地电势对验电装置样机电场测量带来影响, 采用Lora模块以无线的方式发送数据。

5.2 工频电场下标定测试

为了研究验电装置样机电场测量的准确性, 在标准的匀强电场环境中进行校准标定测试。测试标定系统主要由调压器、升压器及匀强电场发生装置



(a) 结构框图



(b) 实物图

图4 验电装置样机结构框图及实物图

3部分构成，匀强电场发生装置两电极板之间的距离为1 m。升压器与悬挂电极板连接，下电极板接地，调压器调节升压器的电压发生变化，引起匀强电场发生装置的场强改变。验电装置样机由绝缘柱支撑放置在匀强电场的中心位置，绝缘柱高度45 cm，样机的轴向垂直于匀强电场发生装置的极板。在幅值0~40 kV/m的工频电场下进行测试，测试曲线如图5所示，测试数据见表1，验电装置样机的电压输出与施加电场之间具有良好的线性关系，测试得到线性度为0.66%，并且测试结果与根据式(15)和式(17)的计算结果有较好的一致性，但仍存在偏差，原因是在计算过程中没有考虑信号处理电路引起的电场畸变，信号处理电路的存在导致在实际测试时验电装置探头附近的电场值要大于仅有单个探头的电场值，所以使得验电装置样机的电场测试结果大于计算值。经计算，验电装置样机的灵敏度为16.876 mV/(kV/m)，而其电压输出的最大值为1650 mV，因此理论上本文研制的验电装置样机的电场测量上限能达到97.77 kV/m。

5.3 验电装置转动引起测量误差试验

开展验电装置转动引起的测量误差试验，研究验电装置的轴向方向与电场方向不一致时对电场测

量的影响。在高压极板上放置高度为5 cm的绝缘柱，验电装置样机的电场探头放置在绝缘柱的顶部，高压极板施加幅值500 V的工频电压。电场探头紧贴绝缘柱顶部从垂直于极板方向逐渐向水平方向旋转，分别选取90°、60°、45°、30°、0°角进行测试，测试结果如图6所示，具体测试数据和相对误差见表2，相对误差 δ 按式(18)计算。

$$\delta = \frac{|V_0 - V_{\perp}|}{V_{\perp}} \times 100\% \quad (18)$$

式中， V_0 为验电装置输出的电压值， V_{\perp} 为验电装置垂直于高压极板时输出的电压值。

测试结果表明，当验电装置样机从垂直于极板方向逐渐向水平方向旋转时，其输出电压值也有降低趋势，但即使旋转到水平方向，也只降低了15.4%；而如果转动到45°，输出的电压值仅降低了4.0%。旋转过程中验电装置输出的电压值降低越小，即电场测量的相对误差越小，越适合实际验电需求。因此，如果验电装置在45°范围内转动，在容许的误差范围内基本上不影响验电的准确性。而如果验电装置样机采用1维球形探头，理论上，旋转到水平位置，由于探头的电场探测方向与被测电场方向相互垂直，所以其输出的电压值将变为0；旋转到45°，输出值将降低29.3%，为套球壳型探头降低量(4.0%)的7.3倍，也是套球壳型探头旋转到水平方向时降低量(15.4%)的1.9倍。从上述的对比可以看出，在不增加信号处理电路复杂性、成本、体积和功耗的前提下，与球形探头相比，套球壳型探头更适用于非接触式交流验电装置。

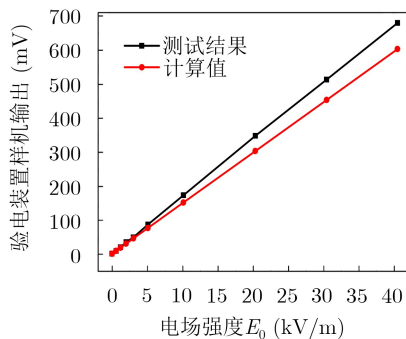


图5 匀强电场中标定测试曲线

表1 匀强电场中的标定测试数据与理论计算结果

预设电压值(V)	实际施加电压值(V)	电场值(kV/m)	验电器样机输出(mV)	计算结果(mV)
0	0	0	0	0
500	576	0.576	8.0	8.6
1000	1198	1.198	19.4	17.9
2000	1992	1.992	34.0	29.7
3000	3030	3.030	48.2	45.1
5000	5080	5.080	86.0	75.7
10000	10120	10.120	172.4	150.8
20000	20300	20.300	347.4	302.5
30000	30400	30.400	512.8	452.9
40000	40450	40.450	679.8	602.7

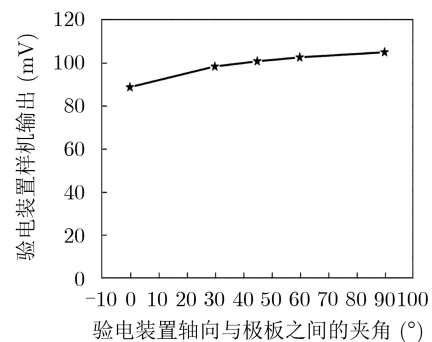


图6 与高压极板间不同夹角验电装置样机输出变化

表2 与高压极板间不同夹角验电装置样机输出及相对误差计算结果

验电装置轴向与极板之间的夹角(°)	0	30	45	60	90
验电装置输出(mV)	88.65	98.25	100.65	102.45	104.85
相对误差(%)	15.4	6.3	4.0	2.2	0

5.4 模拟输电导线试验

为了研究验电装置与输电导线不同距离时电场的变化情况,获取合理的验电阈值,在室内开展模拟输电导线电场测量试验。模拟输电导线包覆绝缘层,受条件限制,本次试验只施加幅值5 kV的工频电压。验电装置样机安装在绝缘杆上,测试逐渐远离模拟输电导线时样机输出的变化情况,结果如图7所示。图7表明,当模拟输电导线施加固定电压时,随着与模拟输电导线之间距离的增加,验电装置样机输出先迅速减小,然后趋于平缓,该结论与输电导线附近电场变化趋势的计算结果相一致^[21]。对图7的测试数据进行曲线拟合,得到验电装置样机输出 V_{out} 与距离 x 之间的拟合方程为 $V_{out} = 1000 / (1.43 + 0.34x)$ 。通过试验可知,验电装置样机可准确识别10 mV以上的输出电压,如果被验电的输电导线的电压为5 kV,那么由上述的拟合方程计算得到,验电装置样机与输电导线之间的最大距离不超过2.94 m才可以实现有效的验电功能。反之,越靠近输电线路,由于样机输出值变化剧烈,阈值易于识别,说明越容易验电。因此可以根据输电导线的额定电压和电力安规要求的安全距离,根据实验获得一个合理的阈值,尽量选择靠近输电导线的位置进行验电操作。

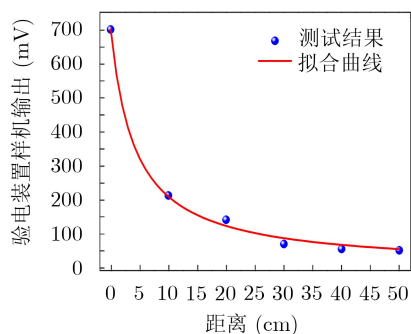


图7 与模拟导线不同距离验电装置样机输出结果

6 结束语

本文基于套球壳型电场探头研制了一种非接触式交流验电装置。首先提出了套球壳型电场探头的设计方案,主要由内球壳、外球壳和填充介质3部分构成;然后在球坐标系下建立电场分布理论模型,得到外球壳表面的感应电荷密度,获得电场探头的灵敏度表达式;之后提出电场探头的等效电路模型,设计接口电路,并分析电路输出电压与电场探头直接差分输出之间的关系;最后成功研制出非接触式交流验电装置样机。为了模拟实际使用环境,避免地电势对电场测量带来的影响,采用Lora模块以无线的方式发送数据进行标定测试。测试结

果表明,验电装置样机的电压输出与施加电场之间具有良好的线性关系,线性度达到0.66%,并且测试结果与计算结果有较好的一致性;验电装置样机从垂直于高压极板的方向旋转到45°时,其输出值仅降低了4.0%,远小1维球形探头的29.3%。模拟输电导线试验则说明,越靠近输电线路,样机输出的电压值的增大速度越快,阈值易于识别,说明越容易验电。

由于本文提出的交流验电装置通过测量电场的方式实现非接触验电,因而无法识别输电线路电压的大小。因此,后续工作将继续改进本文研制的验电装置,例如增加距离测量模块,改进信号处理算法等,这样既可以直接测量带电体电压,又可以测量距离。

参考文献

- [1] 吴龙锋, 黄胜, 胡礼军, 等. 高压验电器的研究综述及展望[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 61-67, 94. doi: 10.3969/j.issn.1673-7598.2018.06.010.
WU Longfeng, HUANG Sheng, HU Lijun, et al. Summary and prospect of high voltage electroscopel[J]. *Smart Power*, 2018, 46(6): 61-67, 94. doi: 10.3969/j.issn.1673-7598.2018.06.010.
- [2] 张忠宝, 姚玉永. 35 kV高压验电器的数显改进与开发[J]. 电工电气, 2009(7): 19-22. doi: 10.3969/j.issn.1007-3175.2009.07.006.
ZHANG Zhongbao and YAO Yuyong. Digital-displayed improvement and exploitation of 35 kV high-voltage electroscopel[J]. *Electrotechnics Electric*, 2009(7): 19-22. doi: 10.3969/j.issn.1007-3175.2009.07.006.
- [3] 廖文强. 浅析电容型验电器在使用中的缺陷及对策[J]. 通信电源技术, 2013, 30(2): 79-80.
LIAO Wenqiang. Analysis of capacitance electroscopel with defects and its countermeasures[J]. *Telecom Power Technology*, 2013, 30(2): 79-80.
- [4] 冯轶, 阮江军, 杜晟磊, 等. 电容型高压验电器故障分析与灵敏度改进[J]. 机电元件, 2014, 34(3): 42-45. doi: 10.3969/j.issn.1000-6133.2014.03.011.
FENG Kun, RUAN Jiangjun, DU Shenglei, et al. A fault analysis and sensitivity improvement of capacitive high voltage electroscopel[J]. *Electromechanical Components*, 2014, 34(3): 42-45. doi: 10.3969/j.issn.1000-6133.2014.03.011.
- [5] KHAN T H, KABIR S M L, HUSSAIN S, et al. Design and implementation of a low cost electricity meter testing bench[C]. 2010 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, Penang, Malaysia, 2010: 34-39. doi: 10.1109/ISIEA.2010.5679499.
- [6] 李禾, 邓志祥, 王闯, 等. 电容型验电器验电盲区问题的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2014(15): 10-13. doi: 10.16628/j.cnki.

- 2095-8188.2014.15.004.
- LI He, DENG Zhixiang, WANG Chuang, *et al.* Study on electrical inspection's dead zone of capacitive detector[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2014(15): 10–13. doi: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2014.15.004](https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2014.15.004).
- [7] 高桂华. 基于场强分布的非接触式超高压验电器设计[D]. [硕士学位论文], 西安电子科技大学, 2014.
- GAO Guihua. The design of non-contact electrocope of ultra-high voltage based on field intensity distribution[D]. [Master dissertation], Xidian University, 2014.
- [8] ZHOU Momo and LI Chunmao. Development of non-contact electrocope[C]. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Chendu, China, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICHVE.2016.7800630](https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800630).
- [9] KURRER R and FESER K. The application of ultra-high-frequency partial discharge measurements to gas-insulated substations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(3): 777–782. doi: [10.1109/61.686974](https://doi.org/10.1109/61.686974).
- [10] KOYAMA T, YOSHIDA T, and IDENO I. Development of a non-contact direct-voltage detector[J]. *JR East Technical Review*, 2012(22): 23–26.
- [11] 胡泽文, 何为, 姚德贵, 等. 高压工频电场警示仪的研究[J]. *电测与仪表*, 2009, 46(9): 45–48.
- HU Zewen, HE Wei, YAO Degui, *et al.* Research of high-voltage power frequency electric field warning instrument[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2009, 46(9): 45–48.
- [12] 谭毓苗. 非接触式高压直流验电器的研究与实现[D]. [硕士学位论文], 重庆理工大学, 2018.
- TAN Yumiao. Research and implementation of non-contact high voltage DC electrocope[D]. [Master dissertation], Chongqing University of Technology, 2018.
- [13] HORTON R, HALPIN M, and WALLACE K. Induced voltage in parallel transmission lines caused by electric field induction[C]. 2006 IEEE 11th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, Albuquerque, USA, 2006: 1–7. doi: [10.1109/TDCLLM.2006.340720](https://doi.org/10.1109/TDCLLM.2006.340720).
- [14] TSANG K M and CHAN W L. Dual capacitive sensors for non-contact AC voltage measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 167(2): 261–266. doi: [10.1016/j.sna.2011.02.019](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.02.019).
- [15] ZHANG Xuemin, ZHANG Peng, SHI Yuqing, *et al.* Hardware design of non-contact voltage detector based on STM32 microcontroller[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 768: 062036. doi: [10.1088/1757-899X/768/6/062036](https://doi.org/10.1088/1757-899X/768/6/062036).
- [16] ZHU Jianjun, LEI Xinglie, SU Ziming, *et al.* Study of non-contact voltage detector of 1000 kV UHV AC based on MEMS electric field sensor[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 160: 02001. doi: [10.1051/mateconf/201816002001](https://doi.org/10.1051/mateconf/201816002001).
- [17] 仝杰, 雷煜卿, 刘国华, 等. 微型电场传感器在工频电场测量中的应用研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(12): 3036–3041. doi: [10.11999/JEIT180217](https://doi.org/10.11999/JEIT180217).
- TONG Jie, LEI Yuqing, LIU Guohua, *et al.* Power-frequency electric field measurement using a micromachined electric field sensor[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(12): 3036–3041. doi: [10.11999/JEIT180217](https://doi.org/10.11999/JEIT180217).
- [18] ZHANG Zhanlong, LI Lin, XIE Xuemei, *et al.* Optimization design and research character of the passive electric field sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(2): 508–513. doi: [10.1109/JSEN.2013.2284201](https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2284201).
- [19] 陈国文. 球形二维工频电场测量系统研究[D]. [硕士学位论文], 华北电力大学, 2012.
- CHEN Guowen. Research on two-dimensional spherical power frequency electric field measurement system[D]. [Master dissertation], North China Electric Power University, 2012.
- [20] 毕德显. 电磁场理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985.
- BI Dexian. *Electromagnetic Field Theory*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1985.
- [21] 杨文翰, 吕英华. 用模拟电荷法求解高压输电线附近电磁场[J]. *电网技术*, 2008, 32(2): 47–50, 55.
- YANG Wenhan and LÜ Yinghua. Application of emulation charge method in calculation of electromagnetic environment near to HV transmission lines[J]. *Power System Technology*, 2008, 32(2): 47–50, 55.
- 杨鹏飞: 男, 1986年生, 讲师, 研究方向为微传感器与微系统、电学量传感器、低频电场探测.
- 闻小龙: 男, 1988年生, 讲师, 研究方向为微型传感器及系统.
- 彭春荣: 男, 1979年生, 研究员, 研究方向为微传感器与微系统、新型电学量传感器及应用.

责任编辑: 马秀强