

便携式工频电场测量装置的设计

刘聪汉¹, 何 为¹, 汪金刚¹, 胡泽文²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 四川省电力公司巴中电业局, 巴中 636000)

摘要: 为了了解设备表面和内部的工频电场, 从而更好地研究设备运行的状态及优化改进设备, 笔者介绍了一维球型电场传感器的测量原理, 设计了一种基于 C8051F410 单片机的便携式工频电场测量装置, 讨论了不同形状及规格电场探头对测量结果的影响并完成了电场探头的选型。在 500 kV 交流输电线下方和实验室简化同心圆球电极内使用该装置与国外标准仪器进行了对比测量, 现场测试结果表明该装置测量数据与国外仪器相比具有较大的相关度, 能准确地测量电力系统工频电场, 具有很好的实用性。

关键词: 电场测量; 便携式; 工频电场; 电场探头

中图分类号: TM937.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)03-0057-06

Design of Portable Power Frequency Electric Field Measurement Device

LIU Cong-han¹, HE Wei¹, WANG Jin-gang¹, HU Ze-wen²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Bazhong Power Supply Bureau, Sichuan Power Grid, Bazhong 636000, China)

Abstract: Measuring principle of one-dimensional spherical sensor for electric field is introduced. A portable power frequency electric field measurement device based on C8051F410 MCU is designed. The influences of different shapes and specifications of electric field probes on measurement result are analyzed, and a suitable electric field probe is hence selected. Measurements of the electric fields under a 500 kV AC power transmission line and inside a simplified concentric ball electrode in laboratory indicate that this device can accurately measure power frequency electric field of power system, and the measured data show high correlation with those from the foreign standard instrument.

Key words: electric field measurement; portable; power frequency electric field; electric field probe

0 引言

电场测量在诸多科学研究和工程技术领域具有重要意义, 特别是在电力系统、电磁兼容及生物电磁效应研究等领域具有广泛应用。在电力系统工程应用中, 常常需要了解设备表面和内部的工频电场, 如超高压输电线路导体表面和附近的电场分布、绝缘子表面电场分布、高压电器内部电场分布等, 从而更好地研究设备运行的状态及优化改进设备^[1-8]; 在电磁效应研究领域, 准确地确定电场强度, 及时发现电场过高、不适于长时间工作的区域, 对长期身处

高压强电场环境下人员的人身安全和健康具有重要意义。

通常确定电场强度的方法有两种: 计算法和测量法。目前国内外学者广泛采用模拟电荷法、边界元法以及有限差分等方法^[9-11]来计算电场强度。尽管这样, 直接测量始终是确定电场强度的最可靠最有效的方法, 尤其是在一些特殊场合, 如高压设备工作在严重污秽环境时, 直接测量更是确定其周围场强的唯一手段^[12-15]。鉴于此, 笔者设计并实现了便携简单、测量准确、可靠性高的工频电场测试装置。

1 球型传感器在交变电场的测量原理

一维球型传感器的结构见图 1, 将一中空的金属

收稿日期: 2011-10-12; 修回日期: 2011-11-21

基金项目: 重庆市自然科学基金攻关项目(2074920070057)。

Project Supported by Key Project of Chongqing Natural Science Fund(2074920070057).

球壳分成两部分,分隔后的上半球面和下半球面为传感器的两个电极。通过绝缘物质将其连接在一起,在传感器的电极间接入测量电容后,电容上产生的电压便可作为测量信号^[16]。

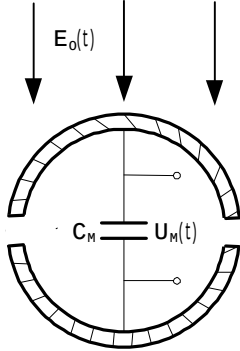


图 1 一维球型传感器

Fig. 1 One-dimension spherical sensor

导体球壳的感应电荷见图 2。在图 2 所示的球坐标系中,真空中的点电荷 $q(t)$ 位于点 $Q(d, \theta, 0)$, 导体球壳的球心与坐标原点 O 重合, 半径为 R 。由球面镜像法可知, 在点电荷与球心 O 的连线上的点 $A(b, \theta, 0)$ 处有与源电荷 $q(t)$ 相异的镜像电荷 $q_1(t)$; 在球心处 O 有与源电荷 $q(t)$ 种类相同的镜像电荷 $q_2(t)$ 。在测量球壳外表面上任取一点 $P(R, \theta, \Phi)$, 它与点电荷 $q(t)$ 、 $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 的距离分别为 r_1 、 r_2 和 R 。

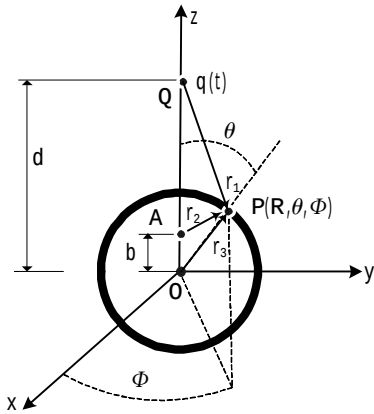


图 2 导体球壳的感应电荷

Fig. 2 Induced surface charge of conduct spherical shell

若令 $c=R/d$, $b=cR=R^2/d$, 由叠加原理可以得到位于球壳外表面点 $P(R, \theta, \Phi)$ 处的电场强度为

$$E_p(t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{q(t)}{r_1^2} e_{r_1} + \frac{q_1(t)}{r_2^2} e_{r_2} + \frac{q_2(t)}{R^2} e_{r_3} \right] \quad (1)$$

根据镜像法原理计算可得^[17-18]

$$q_1(t) = -cq(t) \quad (2)$$

$$q_2(t) = cq(t) \quad (3)$$

$$r_1 = \sqrt{d^2 + R^2 - 2Rd\cos\theta} = d\sqrt{1+c^2-2c\cos\theta} \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{b^2 + R^2 - 2Rb\cos\theta} = R\sqrt{1+c^2-2c\cos\theta} \quad (5)$$

式(1)-(5)中: R 为球壳的半径; d 是球心到点电荷的距离; ϵ_0 是真空介电常数; r, θ, Φ 是球壳外表面 P 点的坐标。因此, 式(1)可化简为

$$E_p(t) = \frac{q(t)}{4\pi\epsilon_0 d R} \left[1 + \frac{1}{\sqrt{(1+c^2-2c\cos\theta)^3}} (c^2-1) \right] \quad (6)$$

根据高斯定理可知, 球壳表面上点 $P(R, \theta, \Phi)$ 的电荷面密度 σ_p 与场强 E_p 的关系为

$$\sigma_p(\theta, \Phi, t) = \epsilon_0 E_p(t) \quad (7)$$

考虑到未放入传感器前待测点 O 处的电场强度 $E_0(t)$ 为

$$E_0(t) = \frac{q(t)}{4\pi\epsilon_0 d^2} \quad (8)$$

由式(6)-(8)可知, 测量球壳的电荷面密度数学表达式^[19]为

$$\sigma(t) = \frac{\epsilon_0 E_0(t)}{c} \left[1 + \frac{(c^2-1)}{\sqrt{(1+c^2-2c\cos\theta)^3}} \right] \quad (9)$$

当 $c \rightarrow 0$, 即 $R \rightarrow 0$ 或 $d \rightarrow \infty$ 时, 将该面电荷密度沿上半球面积分, 可得到上半球面的感应电荷极限值 $Q(t)$ ^[20]

$$Q(t) = \iint \sigma(t) dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sigma(t) R^2 \sin\theta d\theta d\Phi = -3\pi R^2 \epsilon_0 E_0(t) \quad (10)$$

若在球型传感器的两个电极间接入测量电容 C_M , 由 $U=Q/C$ 可知, 在均匀电场中该测量电容上的电压 $U_M(t)$

$$U_M(t) = \frac{-3\pi R^2 \epsilon_0 E_0(t)}{C_M} \quad (11)$$

因此, 当使用一维球型传感器测量均匀电场时, 测量电容两端的电压与被测点的电场强度成正比。因此, 通过测量测量电容上的电压 $U_M(t)$ 就可以得到 $E_0(t)$ 。

2 工频电场测量装置设计

2.1 硬件设计

以 C8051F410 单片机为核心研制的便携式工频电场测量装置由电场探头、模拟信号处理模块、数字信号处理模块和电源模块组成。电场探头实现感应电压的获取; 模拟信号处理模块主要完成探头取样信号的差分放大、带通滤波和有效值转换等; 数字信号处理模块完成信号的模数转换、算法处理、数据显示、温湿度检测及场强超限报警等功能; 为适应野外长时间工作需要, 使用锂电池经电源变换模块处

理后为装置供能。图 3 为系统的原理框图。

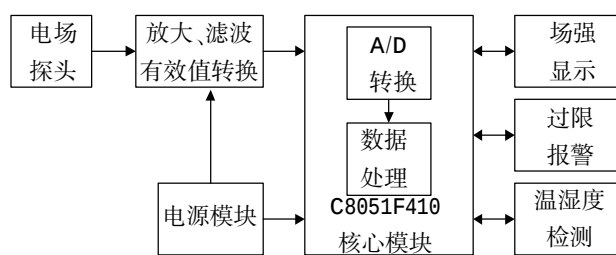


图 3 系统原理框图

Fig. 3 System structure diagram

2.2 电场探头选型

由于球型电场探头设计工艺比较复杂, 加工比较困难, 在实际操作中多边形、平行板等结构电场探头由于制作简单, 运用得较多。对于矩形等多边形结构, 可近似的将其最大对角线长度的一半作为球型探头的等效半径^[21-22]。在均匀场下标定这类结构的电场探头, 同样条件下与球型探头的测量效果很接近, 也能有效地对工频电场进行测量, 而且更易制作。

笔者设计了两种类型的电场探头: 圆柱型和六边型探头, 分别由一中空的金属圆柱和中空金属六面体分成两部分, 分隔后的两极板为探头的两个电极, 并通过绝缘物质将其连接在一起。探头的几何结构见图 4。

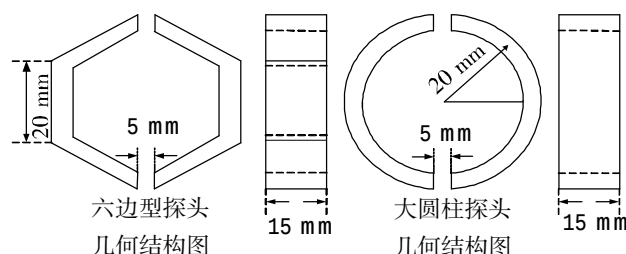


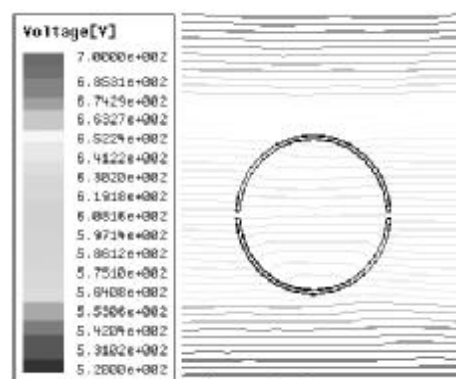
图 4 不同形状电场探头几何结构图

Fig. 4 Geometric structure diagrams of different shape electric probes

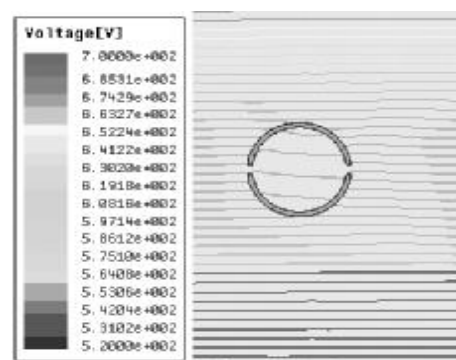
圆柱型探头有两种规格: 半径为 10 mm、高度为 15 mm 的小圆柱探头和半径为 20 mm、高度为 15 mm 大圆柱探头。六边型探头的规格: 边长为 20 mm、高度为 15 mm。

为了验证不同形状和规格电场探头的灵敏度, 通过 Ansoft Maxwell 软件进行了仿真。在两块相距 600 mm、规格都为 600 mm×600 mm×1 mm 的铜板间填充空气介质, 构成一平板电容。在两极板上施加 1 200 V 电压, 由于探头的尺寸相对平板电容而言很小, 可不考虑其对电场的畸变, 忽略边缘效应, 则认为两板间为一个均匀场, $E=2\ 000\text{ V/m}$ 。将不同形

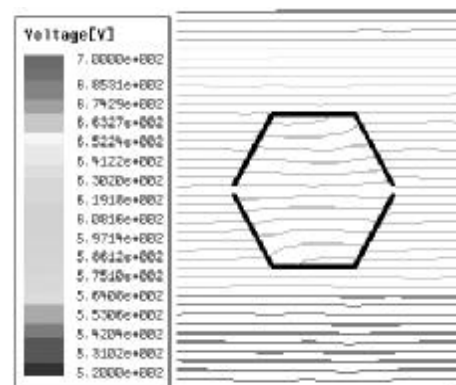
状和规格的电场探头置于该均匀场中进行仿真分析, 分别得到了不同探头空间电压的分布情况, 见图 5。



(a)大圆柱探头空间电压分布



(b)小圆柱探头空间电压分布



(c)六边型探头空间电压分布

图 5 不同电场探头空间电压分布

Fig. 5 Voltage distribution of different electric field probe in space

根据仿真数据得到, 大圆柱探头两个电极间的感应电压 $U_1=53\text{ V}$, 小圆柱探头两个电极间的感应电压 $U_2=14\text{ V}$, 六边型探头两个电极间的感应电压 $U_3=48\text{ V}$, 即大圆柱探头的感应灵敏度最高, 六边型探头灵敏度次之, 小圆柱探头灵敏度最小。

在均匀场下标定上述 3 种规格的电场探头^[23], 将测量装置与德国 Narda 公司的 EFA300 低频电磁分析仪作了对比试验。EFA300 低频电磁分析仪具

有三维各向同性测量探头及 $0.7 \text{ V/m} \sim 100 \text{ kV/m}$ 大动态电场测量范围, 具有很高的准确度, 因此将 EFA300 低频电磁分析仪作为参考的标准仪器, 对比结果见表 1。从测量数据可以看出, 使用大圆柱探头测得的数据精度较高, 误差较小; 六边型探头测得的数据精度次之; 小圆柱探头测得的数据精度最差。尤其在电场较小时, 小圆柱探头所测数据误差更大。测试结果所得结论与仿真结果一致。因此采用大圆柱探头作为便携式工频电场测量装置的探头。

表 1 不同规格电场探头的测量数据

Tab. 1 Measurement data of electric field probes with different specifications

测试电压/kV	电场强度/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)				相对误差/%		
	小圆探头	六边型探头	大圆探头	EFA300 参考探头	小圆探头	六边型探头	大圆探头
4	0.350	0.460	0.500	0.543	35.54	15.28	7.92
5	0.540	0.630	0.700	0.708	23.72	11.01	1.13
6	0.810	0.879	0.920	0.930	12.90	5.48	1.08
7	0.964	1.136	1.111	1.101	12.44	3.18	0.91
8	1.136	1.274	1.250	1.234	7.94	3.24	1.30

3 工频电场测量装置的试验研究及结果分析

3.1 交流输电线路下方电场测量数据

对工频电场测量装置校正之后, 首先在某 500 kV 交流输电线路下方作了对比测量, 检验校正后装置的测量效果。测量条件为: 温度 25°C , 湿度 60% , 装置高度为 1.5 m 。表 2 为这次试验的测试结果。可以看出, 在电场强度低于 1 kV/m 时的相对误差仍然较大。

表 2 500 kV 交流输电线路下的电场测量结果Tab. 2 Measurement data of electric field under 500 kV AC transmission line

测试地点	电场强度/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)		相对误差/%	测试地点	电场强度/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)		相对误差/%
	EFA300	自制装置			EFA300	自制装置	
1	4.975	4.584	7.86	9	2.561	2.731	6.64
2	3.671	3.294	10.27	10	1.317	0.984	25.28
3	3.839	3.448	10.18	11	1.031	1.208	17.17
4	4.734	4.473	5.51	12	0.557	0.182	67.32
5	2.356	2.118	10.10	13	0.813	0.855	5.17
6	1.982	2.096	5.75	14	0.890	0.76	14.61
7	1.308	1.530	16.97	15	1.807	1.691	6.42
8	1.875	1.663	11.31	16	1.538	1.293	15.93

3.2 简化同心圆球电极电场测量数据

高电压技术中, 可将高压试验变压器套管上端球形电极与试验室墙之间的电场简化为同心圆球电

极电场进行近似计算^[24]。简化同心圆球电极见图 6, 内圆球半径为 r , 外圆球半径为 $r+d$ 。

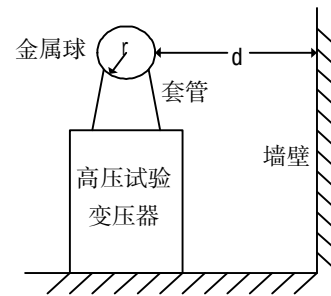


图 6 简化同心圆球电极

Fig. 6 Simplified concentric ball electrode

对工频电场测量装置校正之后, 作了对比测量, 检验校正后装置的测量效果。测量条件为: 温度 15°C , 湿度 35% , 仪器高度 0.5 m 。表 3 为这次试验的测试结果。从测量结果中可以看出, 对探头的线性度进行校正后, 装置的测量准确度有了大幅提高, 最大相对误差仅为 11.78% 。

表 3 简化同心圆球电极电场的测量结果

Tab. 3 Measurement data of electric field inside simplified concentric ball electrode

试验电压/kV	电场强度/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)			相对误差/%	试验电压/kV	电场强度/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)			相对误差/%
	EFA300	自制装置	差/%			EFA300	自制装置	差/%	
1	1.468	1.295	11.78		8	6.610	6.543	1.01	
2	2.176	2.070	4.87		9	7.335	7.268	0.91	
3	2.973	2.856	3.94		10	8.080	7.977	1.27	
4	3.562	3.449	3.17		11	8.970	8.705	2.95	
5	4.312	4.193	2.76		12	9.670	9.450	2.28	
6	5.130	5.046	1.64		13	10.480	10.399	1.35	
7	5.930	5.873	0.96		14	11.370	11.250	1.06	

3.3 结果分析

通过分析上面数据可以发现: 便携式工频电场测量装置在强电磁场环境下的工作性能经受住了考验, 两次测试数据与作为参照的 EFA300 低频电磁分析仪的测试数据接近。但是在电场强度较小时, 误差比较大。这是由于: 在待测电场一定的条件下, 感应电压 U_M 与探头的测量电容 C_M 成反比, 测量电容的选取对于探头的测量范围和精度起着重要作用。兼顾到探头的固有电容的影响、电路的正常工作和高压强场环境, 测量电容 C_M 取的很大, 一般为纳法级^[25]。因此当电场强度 U_M 较低时, 由于选用的测量电容 C_M 太大, 感应电压会变得很微弱, 装置测量性能降低, 误差较大。同时在环境湿度较高时测量数据

的相对误差也较大,这是由于在温度一定时,工频电场强度随湿度的增大呈上升趋势^[26],使测量值偏大。因此应该避免在环境相对湿度较大的情况下(>80%)进行测量,以免增加测量误差。

4 结语

介绍了一维球型电场探头的测量原理,分析了不同规格及形状电场探头的测量性能,根据测量需要设计了便携式工频电场测量装置。在 500 kV 输电线下和简化同心圆球电极电场中进行了工频电场测量。测试表明,装置的测量精度符合工程要求,实现了方案的设计功能。测量装置小巧便携,给复杂环境的电场测量带来便利。

参考文献:

- [1] 牛 林,杜至刚,赵建国.特高压输电线路分裂导线表面电位梯度的计算及其特性分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10):5-9.
NIU Lin, DU Zhi-gang, ZHAO Jian-guo. Calculation and characteristic analysis of surface voltage gradient for UHV transmission conductor bundle[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10):5-9.
- [2] 杨 帆,何 为,姚德贵,等.应用模拟电荷法在线检测劣质绝缘子的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(12):24-26.
YANG Fan, HE Wei, YAO De-gui, et al. The research on the application of simulation charge method in on-line detection of defective insulators [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12):24-26.
- [3] 和彦森,张俊民,袁海文.高压 SF₆ 断路器灭弧室电场优化与分析[J]. 高压电器, 2006, 42(6):442-444.
HE Yan-miao, ZHANG Jun-min, YUAN Hai-wen. Electric field optimization and analysis on high voltage SF₆ circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(6):442-444.
- [4] 袁一飞,汪泉弟,杜松旺. 特高压输电线路工频电场的仿真研究[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 5-7.
YUAN Yi-fei, WANG Quan-di, DU Song-wang. Simulation study of the power frequency electric field of UHV transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 5-7.
- [5] 李永明,何 健,徐禄文,等.超高压输电线路下工频电场抑制方法的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 47-51.
LI Yong-ming, HE Jian, XU Lu-wen, et al. Research on suppression of power frequency electric field due to EHV transmission lines [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 47-51.
- [6] 俞集辉,王国辉.计及地电位升高的超高压交流输电线路工频电场计算[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 22-26.
YU Ji-hui, WANG Guo-hui. Calculation of power frequency electric field strength caused by UHV-AC transmission line considering ground potential rise [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 22-26.
- [7] 杨 芳,郑亚利,张西鹏.超高压输电线下屏蔽线对工频电场的影响[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 64-68.
YANG Fang, ZHENG Ya-li, ZHANG Xi-peng. Shielding lines under the EHV lines affect on power electric-field[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 64-68.
- [8] 张晋寅,蒋龙生,赵 森,等.数字式无线工频电场测量仪的研制[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 22-27.
ZHANG Jin-yin, JIANG Long-sheng, ZHAO Miao, et al. Development of digital wireless measuring system for power frequency electric fields [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 22-27.
- [9] 倪光正.工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
NI Guang-zheng. Engineering electromagnetic field numerical calculation [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.
- [10] ZHAO Tie-bin, COMBER M C. Calculation of electric field and potential distribution along non-ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 15(1):313-318.
- [11] 张占龙,邓 军,李德文,等.多介质工频电场分析的快速多极子边界元法[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(4): 80-85.
ZHANG Zhan-long, DENG Jun, LI De-wen, et al. Fast multi-pole boundary element method analysis for power frequency electric field distribution of multi-medium [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(4):80-85.
- [12] 张 婷,方 志,陈陶陶,等.球形电场测量系统在高压测量领域中的应用[J]. 电测与仪表, 2007, 44(11):11-16.
ZHANG Ting, FANG Zhi, CHEN Tao-tao, et al. Applications of the spherical electric field measurement system in high-voltage measurement field [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(11):11-16.
- [13] VARTTANEOURT G H, CARIGNAN S, JEAN C. Experience with the detection of faulty composite insulators on high-voltage power lines by the electric field measurement method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(2):661-666.
- [14] 汲胜昌,杨兰均,李彦明,等.用于在线监测氧化锌避雷器阻性泄漏谐波电流的电场探头[J]. 高压电器, 2000, 36(1):43-49.
JI Sheng-chang, YANG Lan-jun, LI Yan-ming, et al. Electric field probe for current on-line monitoring of MOA resistance leakage harmonic [J]. High Voltage Apparatus, 2000, 36(1):43-49.

- [15] 邵方殷,柏克寒,张六荣,等.220 千伏至 500 千伏线路杆塔上电场分布和人体感应电流[J]. 电网技术,1992(1): 53-59.
SHAO Fang-yin, BAI Ke-han, ZHANG Liu-rong, et al. Electric field distribution and human induced current on the 220 kV to 500 kV transmission line tower[J]. Power System Technology, 1992(1):53-59.
- [16] 李清泉,刘 健,李彦明.基于光纤的测量瞬态电场的球形传感器[J]. 传感器技术,2002,21(3):14-16.
LI Qing-quan, LIU Jian, LI Yan-ming. Spherical sensor for the measuring transient electric fields based on optical fiber [J]. Journal of Transducer Technology, 2002, 21 (3):14-16.
- [17] 俞集辉.电磁场原理[M]. 重庆:重庆大学出版社,2003.
YU Ji-hui. Electromagnetic field theory [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2003.
- [18] 马信山,张济世,王 平.电磁场基础[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
MA Xin-shan, ZHANG Ji-shi, WANG Ping. Fundamental of electromagnetic field [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [19] FESER K, PFAFF W. A potential free spherical sensor for the measurement of transient electric fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-103(10):2904-2911.
- [20] 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 Ze-wen, HE Wei, YAO De-gui, et al. Research of high-voltage power frequency electric field warning instrument[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(9): 45-48.
- [21] MISAKIAN M, FULCOMER P. Measurement of non-uniform power frequency electric fields[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1983, EI-18(6):657-661.
- [22] LANBERT E. Measurement of electric and magnetic fields from alternating current power lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1978, PAS-97(3): 1104-1114.
- [23] 杨建中,蒋国雄.球形交流电场探头的校正及其对高压电极的影响[J]. 高电压技术,1986(4):1-7.
YANG Jian-zhong, JIANG Guo-xiong. The calibration of spherical AC electric field probes and the effect of the probes on the field of high voltage electrodes[J]. High Voltage Engineering, 1986(4):1-7.
- [24] 解广润. 高压静电场[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1962.
XIE Guang-run. High voltage electrostatic field[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1962.
- [25] 刘 健.基于球形电场探头的空间电场光电测量系统的研制[D]. 西安:西安交通大学,2002.
LIU Jian. The research of space electric field optic-electronic measurement system based on spherical electric field probe[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [26] 俞集辉,郑亚利,徐禄文,等.湿度、温度对工频电场强度的影响[J]. 重庆大学学报,2009,32(2):137-140.
YU Ji-hui, ZHENG Ya-li, XU Lu-wen, et al. Effect of humidity and temperature on power electric-field intensity [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(2):137-140.
- 刘聪汉(1986—),男,硕士研究生,主要从事电磁测量技术。

(上接第 56 页)

- [20] 胡金滨,唐旭清.人工神经网络的 BP 算法及其应用[J]. 信息技术,2004,28(4):1-4.
HU Jin-bin, TANG Xu-qing. BP algorithm and its application in artificial neural network[J]. Information Technology, 2004, 28(4):1-4.
- [21] 丛 爽.神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2001.
CONG Shuang. Neural network, fuzzy logic and its application in motion control[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2001.
- 李华良(1982—),男,硕士,试验工程师,2008 年 4 月毕业于西安交通大学电气工程学院,现就职于西安高压电器研究院有限责任公司,主要从事高压电器产品的质量检验以及相关科研工作。
- 孙 敏(1982—),女,硕士,工程师,2008 年 7 月毕业于西安交通大学电气工程学院,现就职于西安交通大学电气工程学院电工电子教学实验中心,主要从事模拟电子技术实验教学及相关科研工作。