基于平行板传感器设计的高压电场测量安全警示仪

为了更好地了解输电线路和电力设备周围的工频电场，推导了一维球型传感器测量交变电场的数学原理，分析了平行板电容传感器代替球型传感器测量电场的理论可行性，讨论了不同尺寸大小的平行板电容传感器对空间电场测量的影响，并完成了传感器的选定。在上述理论基础上，对安全警示仪的系统总体设计和工作原理进行了介绍，并完成了相关硬件与软件电路的设计，经过程序调试，最终完成了基于C8051F410单片机的高压电场测量安全距离警示仪的设计。在750 kV变电站内以及输电线路下方空间与国外标准仪器对比进行了电场强度的测量，测量数据有较大的相关度，且具有很好的实用性。

秦　睿　杨照光　安亮亮　雷　俊　杨　勇/国网甘肃省电力公司电力科学研究院

秦　睿/高级工程师

关键词/Keywords
电场测量·
工频电场·
平行板传感器·
安全警示仪·

0　引言

在众多科学研究和工程技术领域中，电场测量具有十分重要的地位。尤其是在电力行业中，电场测量已成为一种十分有效的科学研究手段，比如应用于高压电力设备的绝缘结构优化、电力系统的运行状态监测、电力系统的电磁兼容和输电线路周围的电磁环境分析等[1-6]，都会涉及到电场测量的相关知识。随着我国电压等级的不断提高以及高压事业的不断发展，电场测量技术已成为电力行业研究的重点。

在高压变电站、输电线等设备周围的工频电场部分区域，电场强度往往会超过国家标准的允许值5 kV/m[7]。对于在高压线路附近以及变电站内的工作人员来说，电场强度的准确测量对保证输电线路以及变电站作业人员的安全具有重要意义。

通常确定电场强度的方法主要有计算法和测量法两种。目前国内外学者采用的计算方法主要有模拟点合法、边界元法以及有限差分等[8-9]，但是在一些复杂环境下（如严重表面污秽、表面电晕以及欲放电过程等情况），应用测量法得到其电场强度就显得更加准确、方便。因此，本文拟设计并研制一种廉价、耐用以及非接触式的高压电场测量安全警示仪。

1　平行板传感器的分析与设计

处于待测电场中的传感器金属板上会自动产生感应电荷，该感应电荷与待测电场在同一频率下变化，对此感应电荷做相应的处理，使其转换成与待测电场相对应的电压或者电流信号。通过对该信号的提取与计算可以得到待测电场处的电场强度。

交变电场传感器的类型有很多种，比如球型、平行板型、盒型、天线型和圆柱型等。相对于平行板、圆柱型结构的传感器，球型结构的电场传感器可准确计算表面电荷与电场强度之间的关系，且计算得出电场畸变相对较小。因此，本文首先介绍一维球型传感器模型下，电荷感应式电场传感器的测量原理，推导得出感应电荷及电压与待测电场之间的数学关系，为后续传感器的设计与简化提供数学支持。

1.1　球型传感器在交变电场的测量原理

将一中空的金属球壳分为上下两部

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分，分割后的上下两部分分别作为球型传感器的两个电极，中空部分则用绝缘物质将其粘接在一起。在传感器的内部用一个测量电容将金属球壳的上下两个电极连接起来，当球型传感器整体处于垂直于两个半球面的电场内时，金属球壳的两个电极部分会产生感应电荷，内接于传感器两个电极的测量电容则会产生一个感应电压，该电压可作为测量信号[10-11]。一维球型传感器的模型结构如图1所示。

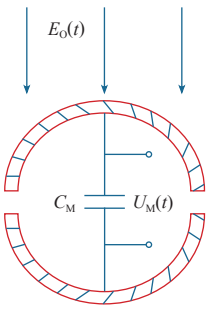


图1　一维球型传感器

建立球型传感器的等效坐标系如图2所示。假设存在一个点电荷，电量为$q(t)$，位于点$Q(0,0,d)$。球型传感器的球心与坐标原点O重合，传感器的半径为R。根据镜像法可得，坐标位置$B(0,0,b)$将有一个与点电荷$q(t)$极性相反的镜像电荷$q_1(t)$；在原点O位置将有一个与点电荷$q(t)$极性相同的镜像电荷$q_2(t)$。在测量球壳外表面任取一点$A(R,\theta,\Phi)$，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。

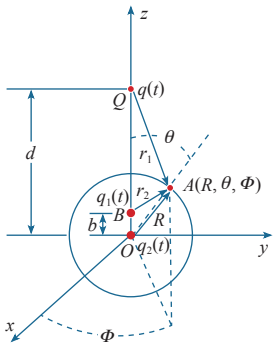


图2　球型传感器等效坐标系

令$c=R/d$，$b=cR=R^2/d$，由叠加定理可得位于球壳外表面的点$A(R,\theta,\Phi)$处的电场强度为

$$E_A(t)=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{q(t)}{r_1^2}e_{r_1}+\frac{q_1(t)}{r_2^2}e_{r_2}+\frac{q_2(t)}{R^2}e_{r_3}\right] \quad (1)$$

根据镜像法原理计算可得[12-13]

$$\begin{aligned} q_1(t)&=-cq(t)\\ q_2(t)&=cq(t)\\ r_1&=\sqrt{d^2+R^2-2Rd\cos\theta}=d\sqrt{1+c^2-2c\cos\theta}\\ r_2&=\sqrt{b^2+R^2-2Rb\cos\theta}=R\sqrt{1+c^2-2c\cos\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

式中，d为球心到点电荷$q(t)$之间的距离；R、θ和Φ为球壳外表面A点的坐标；ε_0为真空中的介电常数。

因此，式（1）可化简为

$$E_A(t)=\frac{q(t)}{4\pi\varepsilon_0 dR}\left[1+\frac{c^2-1}{\sqrt{(1+c^2-2c\cos\theta)^3}}\right] \quad (3)$$

根据点电荷的电场计算公式，在未放入传感器前的待测点O处，未发生畸变的电场强度$E_O(t)$为

$$E_O(t)=\frac{q(t)}{4\pi\varepsilon_0 d^2} \quad (4)$$

由此可得

$$E_A(t)=\frac{E_O(t)d}{R}\left[1+\frac{c^2-1}{\sqrt{(1+c^2-2c\cos\theta)^3}}\right] \quad (5)$$

根据高斯定律，球壳表面点$A(R,\theta,\Phi)$的电荷面密度σ_A与场强E_A之间的关系为

$$\sigma_A(R,\theta,\Phi,t)=\varepsilon_0 E_A(t) \quad (6)$$

可得测量球壳的电荷面密度σ_A为[14]

$$\sigma_A(t)=\frac{\varepsilon_0 E_O(t)}{c}\left[1+\frac{c^2-1}{\sqrt{(1+c^2-2c\cos\theta)^3}}\right] \quad (7)$$

当$c\to 0$，即$R\to 0$或$d\to\infty$时，传感器表面的电场可近似为均匀场。化简电荷面密度的表达式，并对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$Q(t)$，即

$$\begin{aligned} Q(t)&=\iint\sigma_A(t)\mathrm{d}S=\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi/2}\sigma_A(t)R^2\sin\theta\,d\theta\,\mathrm{d}\Phi\\ &=-3\pi R^2\varepsilon_0 E_O(t) \end{aligned} \quad (8)$$

若在球型传感器的两个电极之间接入测量电容C_M，由公式$U=Q/C$可得均匀场下传感器的测量电压$U_M(t)$为

$$U_M(t)=-\frac{3\pi R^2\varepsilon_0 E_O(t)}{C_M} \quad (9)$$

因此，由公式结论可知，当一维球型传感器用于测量均匀电场时，测量电容C_M两端的电压

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$U_M(t)$正比于被测点的电场强度$E_O(t)$，只要测得测量电容两端的电压值，便可计算得出该点处的电场强度。

1.2 平行板传感器的简化与仿真

以上是对应用一维球型传感器作为电场测量时，电场强度与其两端感应电压的关系推导。同时可以证明，在任意情况下的工频电场以及电场是否均匀，球型传感器的两端电压都与其测量点处的电场强度呈正比关系。

然而在实际传感器的设计过程中，相对于圆柱型、平行板型结构的交变电场测量传感器，球型传感器的设计与制作要复杂很多。美国国家安全局的相关人员对一维球型传感器在均匀电场以及非均匀电场下的测量原理和误差进行了详细的分析[14]，并且通过大量的实际测量与试验，发现使用平行板、盒型结构传感器电场仪的测量准确度与使用球型传感器电场仪的测量准确度十分接近[15]。在非均匀电场的测量情况下，测量误差只从球型传感器测量误差的1%增加到2%，可以满足测量要求的一般应用。在实际的工程应用中，当平行板电容传感器的几何尺寸相对于位于较大的空间电场时，理论上可以认为其不会改变原来电场的分布。因此，从工程角度出发，本文采用设计结构易于制作的平行板电容作为电场测量的传感器，通过感应电压得到被测点的电场强度。

在对平行板传感器进行制作之前，通过采用Ansoft Maxwell仿真软件建立相应的模型。仿真建模的步骤如下：①新建Maxwell 2D工程，选择在交变电场情况下的求解器；②绘制平行板传感器以及单相输电线模型，设置平行板传感器材料为铜介质，输电线材料为铝介质，作为近似等效；③选择气球边界条件为无穷远边界条件，在施加气球边界条件的边线上，场线既不垂直边线也不平行于边线。假设绝缘介质充满整个计算领域，并且将计算区域外边界取为求解模型的3倍。施加励磁源设定单相输电线路相应的电压等级为交变30 kV，相位设为0°，分析放置于垂直交流输电线下1 m处平行板传感器其内部电场强度的分布情况。输电线路和平行板传感器周围及内部的电场分布如图3所示。

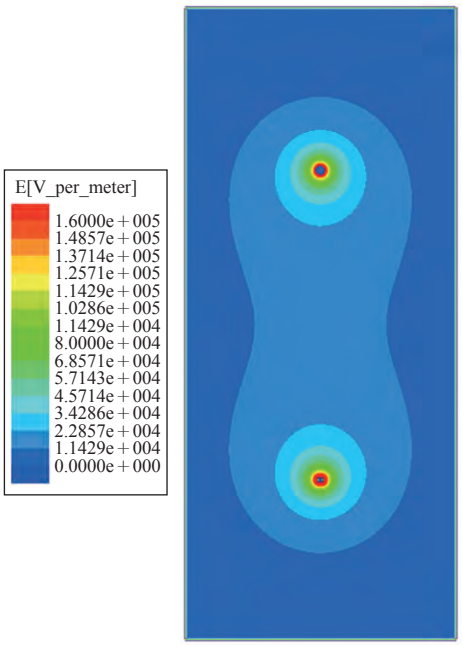


图3 平行板传感器的仿真

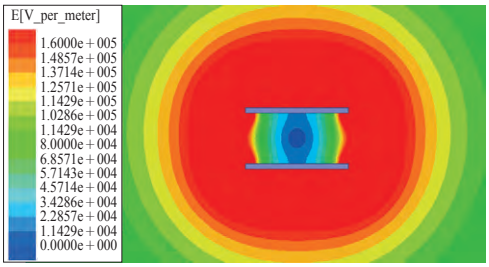
图3中，位于上方的红黄区域为30 kV交流输电线周围的电场强度分布值，而位于下方的红黄区域为平行板传感器在电场强度待测点的电场强度分布值。

改变平行板传感器的面积大小，可以得到在相同电压等级下，不同面积平行板传感器周围及内部的电场分布，如图4所示。平行板传感器的极板面积分别为20×20 mm^2、40×40 mm^{2}以及80×80 mm^2。

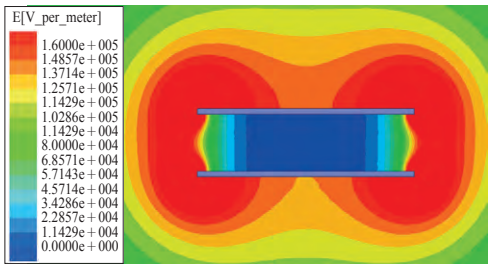
由图4可知，平行板传感器处于空间测量电场时，由于电场引起该导体表面电荷的移动以及导体自身所带电荷使导体附近的整个电场发生变化，此时导体周围的电场称为畸变电场[16]。畸变电场等位线的分布特点为：当有良导体存在时，等位线分布会靠近良导体，使导体附近等位线变得密集；当有高阻抗体存在时，等位线分布会远离高阻抗体，使高阻抗体附近等位线变得稀疏。

由对比分析可得，不同面积大小的平行板传感器对于电场的测量有不同的影响。面积越大，场域中产生的电力线的畸变越大，平行板传感器对空间电场的影响就越大。在实际工程的应用

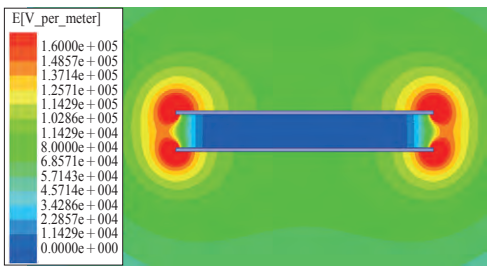
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



（a）平行板传感器极板面积20×20 mm²



（b）平行板传感器极板面积40×40 mm²



（c）平行板传感器极板面积80×80 mm²

图4　不同面积平行板传感器的电场分布

中，当平行板电容传感器的几何尺寸较小时，可以忽略其大小以及对空间电场的改变，即通过传感器测得的电场强度可近似表示为空间电场的大小。因此，本文设计的平行板传感器选择两个极板尺寸为40×40 mm²、厚度为1 mm的铜片。

2　高压电场安全警示仪的硬件和软件设计

高压电场安全警示仪分为硬件设计和软件设计两大部分。系统的总体设计以及工作原理如图5所示。

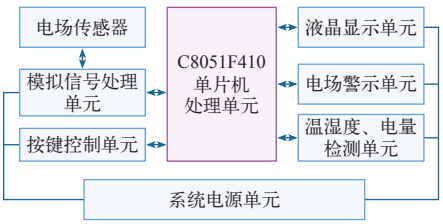


图5　系统工作原理框图

警示仪以C8051F410为核心处理器，电场传感器通过静电感应原理获得被测点的工频电场信号，并转化为易于处理的感应电压信号；模拟信号处理电路完成对感应电压信号的处理；单片机将模拟电路处理的信号进行A－D转换，并对数据进行综合处理得到待测点的电场强度值，与设定的电场限值进行比较，判断是否发出报警信号；液晶显示模块将相关电场强度信息显示在液晶屏中。

2.1　差分放大电路

由于平行板传感器的尺寸较小，其两个极板上感应的电荷也相对较少，在获取传感器传输的输入信号时，其间的感应电压十分微弱，即需要将传感器中的信号进行前置放大。由于测量所处的环境较为复杂，传感器两端的输入信号都会受到传感器本身的干扰，利用其干扰程度相同的特点，可以采用差分式放大电路。当幅值与相位相同的共模干扰信号输入时，差值为零输入信号无效，可以无须考虑。

将电路中输入端两个信号之差作为差分输入电路的有效信号，设计其放大比例系数便可以得到想要的电压输入信号。本文采用AD620仪表放大器来差分传感器的输入信号。差分式放大电路如图6所示。

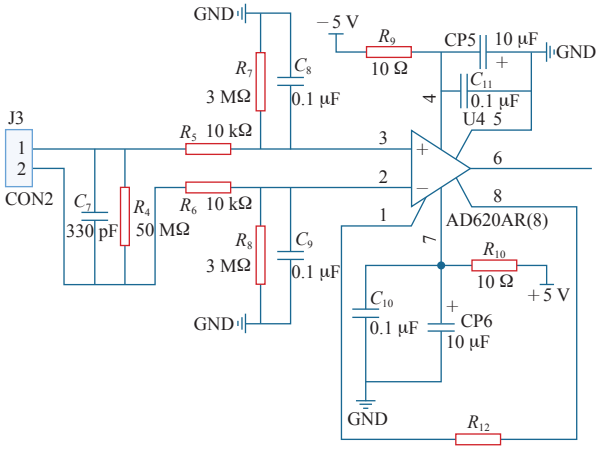


图6　差分式放大电路

图中，R_4用于匹配传感器的输入阻抗；R_5、R_6、R_7和R_8用于将浮地信号转化为对地信号，以便AD620放大器作差分输出；C_8、C_9用于去除信号中

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的高频干扰信号；R_{12}用于调节AD620的增益G_A，其计算公式为

$$G_A=\frac{49.4}{R_G}+1 \tag{10}$$

式中，R_G为增益控制电阻，$R_G=5.1$ kΩ，输入信号经过差分电路后，放大倍数为10倍，并转化为对地电压信号。

2.2 可控比例放大电路

可控比例放大电路的设计是为了满足输入信号与AD满量程电压之间的相互匹配。电压等级的范围为35～750 kV。本文采用OP07C运算放大器与AD公司生产的多路开关ADG1611完成增益控制的功能，原理如图7所示。

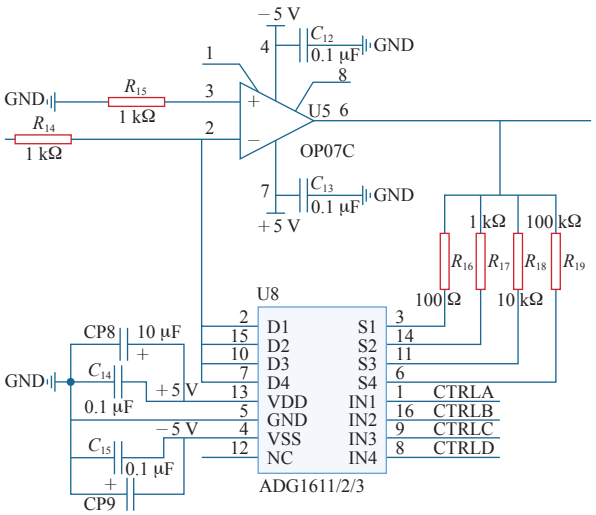


图7 可控比例放大电路

图中，OP07C放大器构成比例放大电路，进行放大输入信号的功能；ADG1611控制反馈电阻R_f(R_{16}、R_{17}、R_{18}和R_{19})，放大倍数为$G_D=R_f/1$k。4个反馈电阻由ADG1611来控制其投切，如图8所示，IN1～IN4分别控制S1、D1～S4和D4的通断。

当Sx($x=1$、2、3、4)为低电平时，该路开通；当Sx($x=1$、2、3、4)为高电平时，该路关断。S1～S4分别连接至单片机的P1.3～P1.6的I/O口，由单片机来控制反馈电阻的投切。

2.3 主程序流程

硬件电路设计完成后，需要对系统编制程序之后才能进行相应的控制。编程开发软件采用的

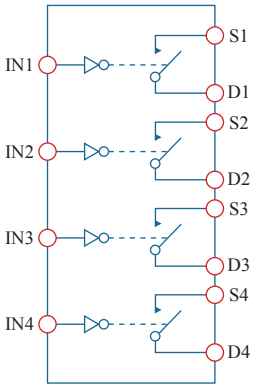


图8 ADG1611管脚关系

是Keil μ Vision4。主程序流程如图9所示。

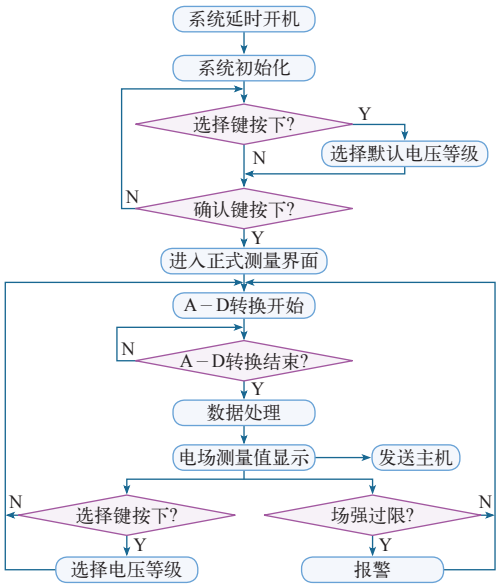


图9 主程序流程

警示仪的主要工作流程如下：系统首先延时开机，然后进入测量初始化阶段，逐步完成各个电路模块的自检，ADC0对电压信号进行A－D转换，在结束一个采样转换周期后，由单片机进行数据分析处理，并将得到的电场值在LCD液晶屏中显示出来。当测量电压值超过所设电压等级的上限值时，系统便会报警。

3 试验结果分析及结论

将设计完成并且校正之后的高压电场安全警示仪于实际工况环境中进行试验，并将取得的测量数据与标准电磁场测量设备的测量标准值进行比较分析。标准电磁场测量设备选用德国Narda公

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

司生产的PMM8053，其具有很高的准确度。试验的目的主要有两方面：①验证电场强度测量警示仪对变电站内以及输电线路下方空间电场强度测量的准确性；②验证电场强度测量警示仪在超出其所设定的电场强度时是否能够实现报警功能。

3.1 主变压器出线端附近测量数据

使用电场强度测量警示仪与标准电磁场测量设备PMM8053，在位于330～750 kV主变压器750 kV出线端附近相同位置处（相同位置、相同距地高度）分别进行电场强度的测量，记录并对比试验数据，验证电场强度测量警示仪测量准确性以及能否实现报警功能。

试验时首先将PMM8053标准电磁场测量设备安置于主变压器750 kV、A相出线端附近，探头距地1.40 m，测量并记录电场强度值；其次工作人员手持电场强度测量警示仪，手持警示仪的位置距地1.40 m，在相同位置处测量电场强度值，并在多次测量记录后取平均值。测量数据如表1所示。

表1 主变压器A相750 kV出线端距地1.40 m处电场强度检测值

测量次数	警示仪测量值/kV	PMM8053标准值/kV	标准值与均值误差(%)
1	8.202		
2	8.186		
3	8.349		
均值	8.245	8.258	0.013

重复上述试验，依次在主变压器750 kV、B相和C相出线端附近进行测量并记录数据。测量数据如表2所示。

表2 主变压器B相750 kV出线端距地1.40 m处电场强度检测值

测量次数	警示仪测量值/kV	PMM8053标准值/kV	标准值与均值误差(%)
1	7.162		
2	7.096		
3	7.214		
均值	7.007	7.104	−0.097

3.2 结果分析

通过对表1、表2中的试验结果进行分析，可以得出以下结论：

1）本文所设计的电场强度测量警示仪适用于高压输电线路下电场强度的测量，能够较为准确地测量出变电站内高电压情况下的电场强度。使用本测量警示仪与标准电磁场测量设备PMM8053在相同位置进行电场强度测量，将测得的相关数据进行比较，可得到其测量数据与国外测量仪器的测试结果相关度很高，所测数据之间的误差在工程实施允许的范围之内，具有较好的一致性，并且验证了警示仪在强电场的情况下有良好的工作稳定性以及测量性能，可用于工程应用。

2）试验过程中，由于测试环境的电压等级为750 kV，设置测量警示仪的工作电压等级也为750 kV。在测量主变压器出线端电场强度时，电场强度测量警示仪将自动设定为750 kV电压等级下的报警值。在相关试验人员的监督下，当测量点的电场强度超过电场强度测量警示仪设定报警值时，测量警示仪能够实现报警功能，发出滴滴警示声提醒现场作业人员，从而证明电场强度测量警示仪能够较为准确地实现报警的功能。

4 结束语

介绍了一维球型传感器在交变电场中的测量原理，分析了球型传感器与平行板传感器的关系，为球型传感器简化为平行板传感器打下基础。对同一电压等级下不同尺寸的平行板电容传感器周围的电场分布以及对空间自身环境电场的影响进行软件仿真，选择尺寸相对较小的平行板传感器进行设计。设计硬件电路以及软件电路时，根据测量要求设计并制作了高压电场测量安全警示仪。在750 kV变电站内以及输电线路下方空间进行电场强度的测量，与标准电磁测量设备对比验证其准确性。测试表明，装置测量准确度符合工程要求。

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梯度的计算及其特性分析 [J]．电力自动化设备，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．

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[3] 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．

[4] 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．

[5] 杨芳，郑亚丽，张西鹏．超高压输电线路下屏蔽线对工频电场的影响 [J]．高压电器，2011，47 (7)：64-68．

[6] 张晋寅，蒋龙生，赵淼，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．

[7] 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．

[8] 王尔智，佟立柱，李成．电器中三维电场的有限元法 [J]．沈阳工业大学学报，1996，18 (3)：1-5．

[9] 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．

[10] 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．

[11] 李清泉，刘健，李彦明．基于光纤的测量瞬态电场的球型传感器 [J]．传感器技术，2002，21 (3)：14-16．

[12] 俞集辉．电磁场原理 [M]．重庆：重庆大学出版社，2003．

[13] 马信山，张济世，王平．电磁场基础 [M]．北京：清华大学出版社，1994．

[14] Misakian M，Fulcomer P．Measurement of no uniform power frequency electric fields [J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，1983，18 (6)：657-661．

[15] Bohnert K，B Randle H，Frosido G．Field test of interferometric optical fiber high-voltage and current sensors [J]．Proc. of SPIE，1994，23 (60)：16．

[16] 王泽忠，李成榕，李鹏，等．用球型三维电场探头测量变电站瞬态电场 [J]．华北电力大学学报，2002，29 (3)：16-19．

（收稿日期：2015－10－26）EA

Weidmüller

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪
—— 高效透明的生产电能监测

魏德米勒Energy Meter电力参数测量仪不仅能监测电能的消耗，它还能监测电能质量的基本参数和分析来自不同导体的电流的细微差别，使电力行业用户能够快速地了解生产设备中电能参数的变化情况，保证其稳定和高效率地使用。具有综合功能的Energy Meter电力参数测量仪使您可以将生产点的能源网络分块测量，尽可能精确地进行监测，配备有一体的液晶显示屏，重要的监测数据如电压、电流、功率和能耗都能一目了然。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21 22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

扫一扫，关注魏德米勒官方微信

Let's connect.

(C)1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net