

文章编号: 1001- 1609(2006) 03- 0164- 03

# 同轴结构电极边缘效应的仿真研究

黄文力<sup>1,2</sup>, 孙广生<sup>1</sup>, 李光杰<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

Simulation of Edge-effect of Coaxial Electrodes Structure

HUANG Wen-li<sup>1,2</sup>, SUN Guang-sheng<sup>1</sup>, LI Guang-jie<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;  
2. Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

摘要: 同轴结构电极在高脉冲功率装置中广泛存在。利用 ANSYS 有限元数值计算软件包仿真计算内电极直径、闪络距离、固体介电常数等参数变化时对同轴空间电位(电场)的影响;与解析解比较,确定同轴电极边缘效应的变化趋势,得到同轴电极边缘效应不影响固体表面闪络特性的电极有效长度;给出一定内电极直径范围内的最小电极长度与内电极直径、闪络距离之间的参考关系式,对同轴电场下闪络特性的实验研究有着重要的指导意义。

关键词: 同轴电极; 边缘效应; 仿真计算

中图分类号: TM151

文献标识码: A

Abstract: Coaxial electrodes structure is applied widely in high power pulse apparatus. Based on ANSYS software package, the influence on coaxial spatial electric potential or electric field strength is calculated as the parameters variation, such as inner electrode diameter, flashover length, and solid dielectric factor, etc., Through comparing calculating results with simulating results, variable tendency of edge-effect of coaxial electrodes is ascertained. The effective length of the electrode is attained, in which edge-effect of coaxial electrodes doesn't interfere flashover properties on solid dielectric surface, and reference equations between the least electrode length and inner electrode diameter and flashover length in the some range of inner electrode diameter are pointed out. The simulating results can guide experimental study on flashover properties in coaxial electrodes.

Key words: coaxial electrodes; edge effect; simulating calculation

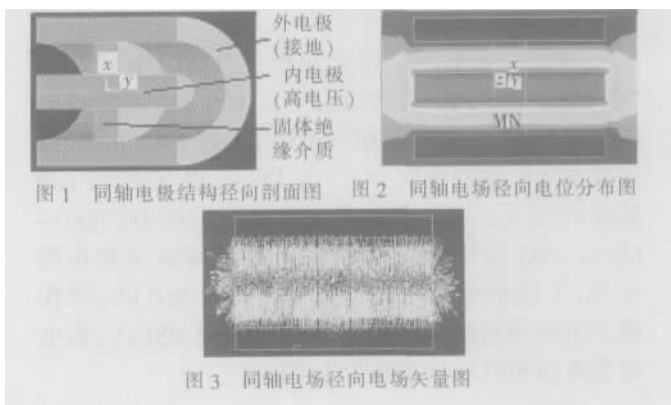
## 1 引言

为了研究固-液或固-气交接面在同轴电场下的闪络特性,实验时必须考虑电极端沿边缘效应可

能对交接面闪络特性的影响<sup>[1-3]</sup>。为了排除可能的电极边缘效应影响,需要确定电极端沿与交接面的有效间距,在该距离下,电极边缘效应不能够对交接面闪络特性构成影响。笔者利用 ANSYS 数值计算软件包比较详细地分析了同轴电极结构不同参数变化下电极边缘效应的变化趋势,得到了同轴电场下不影响固体表面闪络的电极有效长度,它对同轴电场下闪络特性的实验研究有着重要的指导意义。

## 2 同轴电极与电场

图 1 为同轴电极结构径向剖面图,内外电极均为良好导体;图 2 为同轴电场径向剖面电位分布图;图 3 为径向剖面电场矢量分布图。从图 2 和图 3 中可以看出,同轴电场电位降由内电极向外电极迅速减小,电力线分布由紧密向稀疏变化,在电极两端附近的一定区域里,受边缘效应的影响,电场分布与同轴电极内部相比有较大的畸变。同轴结构电极的同轴电场空间电位和电场强度计算的解析式为<sup>[4]</sup>:



$$= \frac{u_0 \ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)}; E = - \frac{u_0}{r \ln(R_2/R_1)}$$

式中: 为极间任一点的电位; E 为极间任一点的电

收稿日期: 2005- 12- 06; 修回日期: 2006- 01- 02

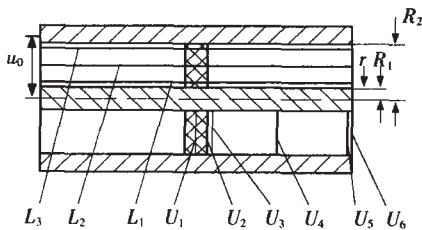
基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 黄文力(1974-),男,博士研究生,从事脉冲功率、高电压技术方面的研究。

场强度;  $u_0$  为外加直流电压;  $R_1, R_2$  分别为内外电极的半径;  $r$  为空间一点的半径。利用公式确定无电极边缘效应影响的理想状态下的同轴电场空间分布, 并与 ANSYS 仿真<sup>[5]</sup>数值解比较, 就可确定同轴电场边缘效应的空间变化趋势与影响区域。

### 3 仿真结果与分析

利用同轴电极半剖面内轴向 3 条直线、径向 6 条直线仿真研究同轴电场的边缘效应, 见图 4。图为半剖面轴对称, 分别在上半空间画出待研究的轴向直线, 下半空间画出径向直线。选取参考电极尺寸: 内电极与外电极径向距离为 5 mm, 电极轴向长度为 30 mm; 内电极半径为 1 mm, 外电极内半径为 6 mm, 外半径为 9 mm; 圆环试样厚度为 5 mm, 内半径为 1 mm, 外半径为 6 mm, 相对介电常数为 2.3。内电极加电压 10 000 V, 外电极接地。保持 ANSYS 剖分过程中对同轴电场空间相同的剖分程度。

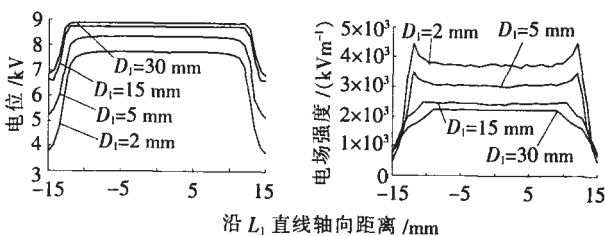


$L_1$ ——距离内电极表面 0.5mm  $L_2$ ——内外电极径向中间位置  
 $L_3$ ——距离外电极内表面 0.5mm  $U_1$ ——试样内部中间  
 $U_2$ ——试样表面  $U_3$ ——远离试样表面 0.5mm  $U_4$ ——试样表面与电极端沿之间的中间位置  $U_5$ ——小于电极端沿 0.5mm  $U_6$ ——电极端沿处

图 4 同轴电极半剖面 and 计算选取线示意图

为了方便说明, 径向直线电位(电场)变化曲线坐标刻度用标么值表示, 横坐标  $x$  为极间任一点半径与相应内电极半径差值和内外电极半径差的比值, 即  $x=(r-R_1)/(R_2-R_1)$ , 纵坐标  $y$  为电场数值解与解析解差值的绝对值和解析解的比值, 即  $y=|\text{数值解}-\text{解析解}|/\text{解析解}$ , 表示电场的失真度即受边缘效应影响的程度; 轴向直线电位(电场)变化曲线横坐标刻度用电极长度数值表示, 纵坐标  $y$  采用标么值。

由仿真计算可知, 沿同一直线(径向或轴向)的电位与电场强度变化趋势相似, 见图 5。当内电极直径  $D_1$  按 2, 5, 15, 30 mm 变化时, 沿轴向直线  $L_1$  电位与电场均在同轴电极端沿受边缘效应的影响变化比较大, 而在  $L_1$  的中间附近基本不受影响。另一方面, 由



(a) 电位变化 (b) 电场变化

图 5 在不同内电极直径  $D_1$  下沿  $L_1$  直线电位及电场的变化

于电场受仿真计算精度影响误差较大, 所以为了简化分析, 在轴向与径向只研究沿不同空间位置直线电位的分布。

另外, 图 6 为在参考电极尺寸下沿径向不同直线  $U_3, U_4, U_5, U_6$  电位的失真度, 显示边缘效应沿径向呈倒 U 形分布, 径向直线越接近电极端沿, 电位(电场)受边缘效应影响越明显, 边缘效应影响最大值随径向直线沿轴线离开电极端沿向固体表面移动 ( $U_6-U_5-U_4-U_3$ ) 而逐渐靠近外电极, 见图 6 中趋势线所示, 表明轴向边缘效应的影响沿  $U_6-U_5-U_4-U_3$  越来越弱, 沿  $U_3$  直线电位的微小波动被认为是由数值仿真计算误差引起的。由图 6 可知, 径向受边缘效应影响最严重的位置在径向中间的某个位置, 这表明在水平方向, 与  $L_1$  和  $L_3$  直线相比, 沿  $L_2$  直线受边缘效应影响最深, 因而以下主要分析同轴电极结构不同参数变化时沿直线  $L_2$  的电位失真度。

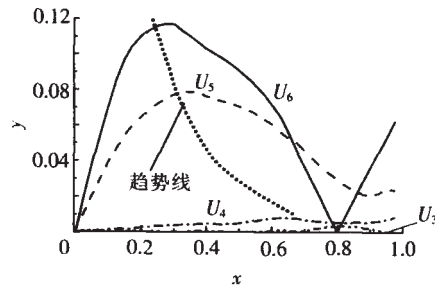
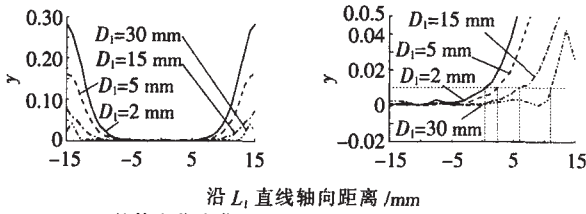


图 6 沿不同径向直线的电位变化

#### 3.1 内电极直径变化

仿真过程中, 外电极径向厚度、绝缘试样轴向厚度、固体介质介电常数、内外电极半径差值、内外电极轴向长度、外加电压等参数均保持不变。内电极直径  $D_1$  取 4 个不同的数值: 2, 5, 15, 30 mm, 相应改变外电极的内直径  $D_2$  等于内电极直径  $D_1$  加上  $2 \times 5$  mm, 即  $D_2=D_1+2 \times 5$  mm。

不同内电极直径下沿直线  $L_2$  电位失真度见图 7, 可以看出, 随着内电极直径变粗, 空间对应位置  $L_2$  直线上受边缘效应影响的距离越短, 也就是说, 当内电极直径变小, 固体介质表面在同轴电场下的闪络特性为了不受同轴电极边缘效应的影响, 需要延长从固体介质表面到电极端沿的距离, 即采用更长的同轴电极。图 7(b) 为图 7(a) 的局部放大图, 当  $y$  坐标上的电位数值解与解析解差值占据解析解的比例小于 0.01 时, 可认为此时同轴极间电场不受边缘效应的影响, 则能够确定内电极直径变化时相应的同轴电极间可以忽略边缘效应影响的空间位置, 如当闪络距离为 5 mm, 内电极直径  $D_1$  按 2, 5, 15, 30 mm 变化, 沿着  $L_2$  可以忽略边缘效应影响的最小电极长度见表 1 (图 7(b) 中水平和垂直虚线), 最小电极长度也就是同轴极间轴向受电极边缘效应影响的最大深度。因此, 为了保证实验时固体表面的沿面闪络特性不受电极边缘效应的影响, 同轴电极端沿与固体介质表面之间的距



(a)整体电位变化 (b)局部电位变化  
图 7 不同内电极直径下沿  $L_2$  直线的电位变化

表 1 内电极直径  $D_1$  变化沿  $L_2$  直线的最小有效同轴电极长度 单位: mm

$D_1$	L	$D_1$	L
2	4.7	15	2.3
5	3.8	30	0.5

离不能小于该长度。最小电极长度与内电极直径近似表现为斜率 6.8 线性减小, 近似遵循的关系式为:  $L = -0.15 D_1 + 4.55$ , 其中: L 为最小有效电极长度, mm, 在大于零的范围内取值;  $D_1$  为内电极直径, mm。

### 3.2 闪络距离(内外电极半径差)变化

仿真过程中保持外电极径向厚度、绝缘试品轴向厚度、试品介电常数、内电极半径、内外电极轴向长度、外加电压等参数均不变。闪络距离取 4 个不同的数值: 1, 5, 10, 20 mm, 相应改变外电极的半径等于内电极半径加上闪络距离。同样主要研究轴向沿  $L_2$  直线电位变化。

由图 8 可知, 如果 y 坐标上的也即电位数值解与解析解差值占据解析解的比例仍然按照 0.01 取值, 则随着闪络距离每增加 5 mm, 沿着直线  $L_2$  受边缘效应影响的长度增加约 4 mm, 当闪络距离和电极端沿与固体介质表面间距相等 (闪距/间距 = 10/10 mm) 时, 在参考电极尺寸下, 则只在距离固体介质表面约 3 mm 的范围内, 可以认为闪络特性不受同轴电场边缘效应的影响。

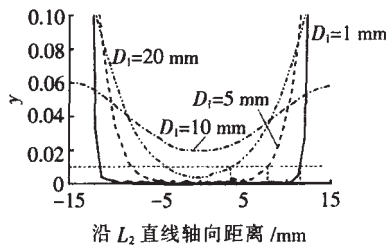


图 8 不同闪络距离沿  $L_2$  直线电位变化

### 3.3 其它参数变化

固体介质介电常数变化对同轴电极极间同一位置电场及电位的影响很小; 改变内电极外加电压对任一极间位置边缘效应的影响相同; 当固体介质厚度增

加, 固体介质沿面闪络为了避免受电极边缘效应的影响, 电极长度也应该相应地增加, 按 1: 1 比例变化。

## 4 讨论

同轴电场边缘效应影响与内电极直径、闪络距离关系密切, 受固体介质介电常数、外加电压等其它参数影响较小, 受边缘效应影响的极间深度与内电极直径近似成反比, 与闪络距离近似成正比。根据边缘效应与内电极直径、闪络距离之间的变化关系, 可以给出最短有效同轴电极长度 (即同轴内外电极端沿与固体表面之间的距离) 与内电极直径、闪络距离之间的参考关系式:  $L = (-0.15 D_1 + 4.55) \cdot h/5$ 。式中: L 为最小电极长度, mm, 在大于零的范围内取值;  $D_1$  为内电极直径, 小于 30 mm; h 为闪络距离, mm。

## 5 结语

(1) 边缘效应沿径向呈倒 U 形分布, 且最大值在同轴电场极间随着径向直线离开电极端沿向固体表面移动 ( $U_6-U_5-U_4-U_3$ ) 而逐渐向外电极接近。

(2) 根据沿  $L_2$  直线电位随内电极直径与闪络距离的变化规律, 当内电极直径大于 2 mm 时, 依据 0.01 阈值, 当电极端沿与固体表面之间的距离大于固体表面闪络距离时, 可以认为闪络特性不受电极边缘效应的影响, 边缘效应影响的极间深度与内电极直径、闪络距离之间的关系为  $L = (-0.15 D_1 + 4.55) \cdot h/5$ 。

(3) 固体介质介电常数、外加电压的变化不改变边缘效应的影响分布, 固体介质厚度增加时, 同轴电极长度应该线性延长, 当然, 固体介质引入对同轴电场分布可能的影响还需要进一步的研究。

## 参考文献:

- [1] Danikas M G. Streamer Propagation Over a Liquid/solid Interface [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(2): 348-350.
- [2] Atten P, Saker A. Streamer Propagation Over a Liquid/solid Interface [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1993, 28(2): 230-242.
- [3] Lehr J M, Agee F J, R. Copeland R, et al. Measurement of the Electric Breakdown Strength of Transformer Oil in the Sub-nanosecond Regime [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 857-861.
- [4] 冯慈璋. 电磁场(第 2 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [5] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖. ANSYS 工程应用教程(热与电磁学篇)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.