基于ANSYS的40.5 kV真空灭弧室电场分析

建立了电压等级为40.5 kV真空灭弧室的二维模型，利用有限元软件ANSYS计算并分析了该40.5 kV真空灭弧室在不同主屏蔽罩半径下的电场和电位分布，对比了不同主屏蔽罩半径下触头沿面的电场强度分布以及波纹管屏蔽罩与主屏蔽罩弯角之间的电场分布。结果表明：①主屏蔽罩半径越大，其电场强度越小，当半径大到一定程度时，电场强度不再随主屏蔽罩半径的变化而变化；②当主屏蔽罩半径为57 mm时，该40.5 kV真空灭弧室内部场强分布最为均匀。

方煜瑛[1]　康　凯[2]　杨海军[2]　董华军[1,2,3]／1.国家电网平高集团有限公司
2.大连交通大学机械工程学院　3.大连理工大学电气工程学院

方煜瑛／高级工程师

关键词／Keywords
真空灭弧室·
电场计算·
主屏蔽罩半径·

电力技术的进步有助于国民经济的发展，同时对经济发展起着重要的支撑作用。然而电力技术的发展与进步离不开相关设备的支持，未来电力设备主要朝着小型化、安全环保和高可靠性的趋势发展。

真空断路器作为电力系统中的重要部件，其安全可靠的开断可为电力系统的正常运行提供有效保障。而真空灭弧室作为真空断路器的核心部件，其未来主要朝着大电流、高电压和小型化的方向发展。因此开发出满足上述要求的真空灭弧室成了首要任务[1]。其主要设计之一就是要合理设计真空灭弧室内部各零件的结构和尺寸，满足真空灭弧室的绝缘要求。

本文建立了主屏蔽罩半径分别为54 mm、57 mm和60 mm三个不同尺寸的40.5 kV真空灭弧室有限元模型，并利用有限元软件ANSYS分别对其进行电场的数值计算和分析，得到其电场强度和电位分布。描绘了触头沿面的电场分布曲线以及波纹管屏蔽罩与主屏蔽罩弯角之间的电场分布曲线，分析了不同半径的主屏蔽罩对真空灭弧室电场和电位分布的影响。

国家自然科学基金项目（51207016，51477023），辽宁省高等学校优秀人才项目（LJQ2014046）。

40.5 kV真空灭弧室电场模型的建立

真空灭弧室的绝缘强度设计主要是合理布置灭弧室内部结构，使电场分布更加均匀，降低触头间的电场强度，同时减小触头表面的有效面积[2]。真空灭弧室主要由动静触头及其连接件、各屏蔽罩和绝缘外壳组成。本文建立了40.5 kV真空灭弧室的二维简化模型，如图1所示。

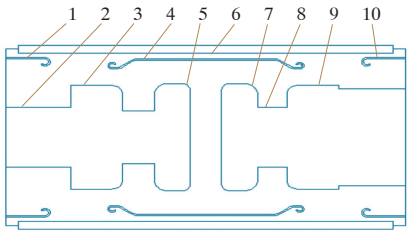


图1　40.5 kV真空灭弧室结构示意图

1,10—端部屏蔽罩　2—静导电杆　3—均压屏蔽罩　4—主屏蔽罩　5—静触头　6—绝缘外壳　7—动触头　8—动导电杆　9—波纹管屏蔽罩

真空灭弧室的电场计算满足以下公式和边界条件：

1）灭弧室电场的计算满足轴对称Laplace方程，即

$$\frac{\partial\left(\frac{r\partial\varphi}{\partial r}\right)}{r\partial r}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}=0 \qquad (1)$$

2）陶瓷外壳与空气及真空交界处满足

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \dfrac{\varepsilon_1 \partial \varphi_1}{\partial n} = \dfrac{\varepsilon_2 \partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \tag{2}$$

3）对主屏蔽罩表面有

$$\begin{cases} \varphi = U_{Fi} \\ \oint_{S_i} \dfrac{\partial \varphi}{\partial n} \mathrm{d}S_i = Q_i \end{cases} \tag{3}$$

式中，φ_1、φ_2和ε_1、ε_2分别为相邻两种介质中的电动势值和相对介电常数；U_{Fi}为待求电动势值；S_i为第i个悬浮导体的表面积；Q_i为第i个悬浮导体上的电荷量。

4）动静触头及与之相连的导电杆上的电位已知。

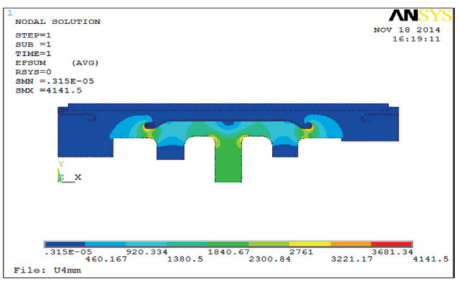
40.5 kV真空灭弧室电场计算结果

真空灭弧室内部所有部件都呈现出对称性，因此本文在进行电场计算时采用轴对称的二维有限元模型。

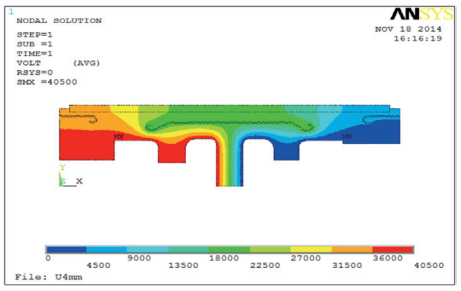
本文计算的40.5 kV模型触头开距为18 mm，施加到静触头及其连接件上的电压为40.5 kV，施加到动触头及其连接件上的电压为0 V，各悬浮屏蔽罩的电位可以通过计算得出。

通过计算求得主屏蔽罩半径为54 mm、57 mm和60 mm时的电场和电位分布如图2所示。

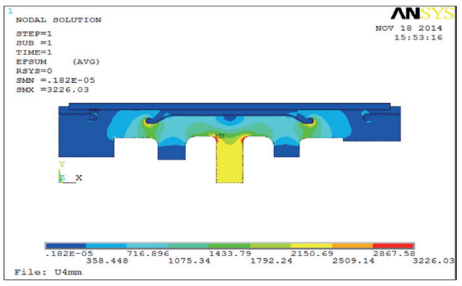
从图2的电场分布中可以看出，当主屏蔽罩半径分别为54 mm、57 mm和60 mm时，动静触头之间的电场分布都较为均匀，最大电场强度分别为4 141.50 V/mm、3 226.03 V/mm和3 196.41 V/mm。通过对比不同主屏蔽罩半径情况下的最大电场强度值可以发现，随着半径的增大，最大电场强度逐渐变小。



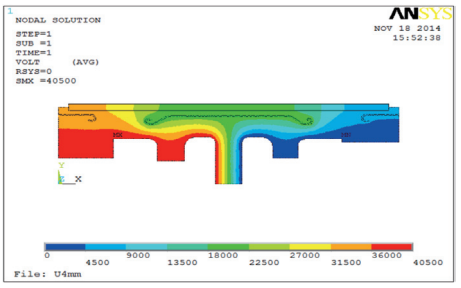
（a）R_{54}电场分布图



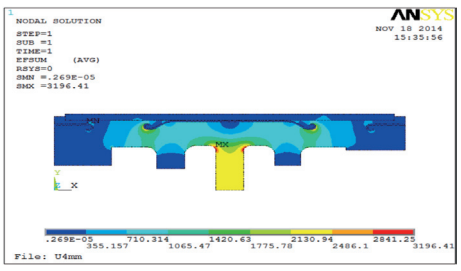
（b）R_{54}电位分布图



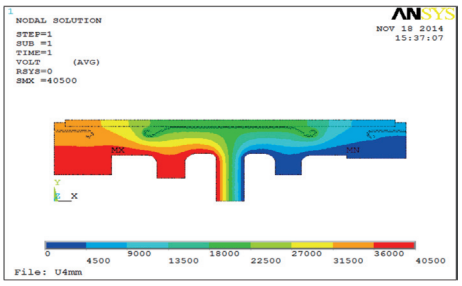
（c）R_{57}电场分布图



（d）R_{57}电位分布图



（e）R_{60}电场分布图



（f）R_{60}电位分布图

图2　40.5 kV真空灭弧室电场和电位分布

图2中的电位分布非常均匀，并且等位线沿着

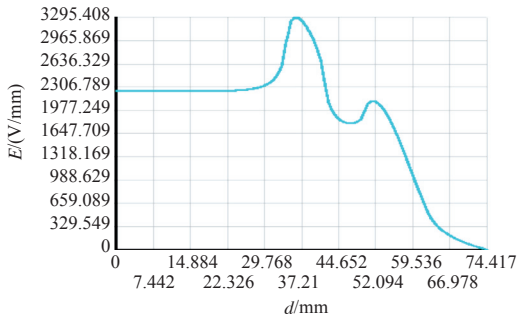
(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

动静导电杆的方向向两侧均匀扩散，这样就避免了由于在较小区域电力线过分集中而导致其承受较大电压所引起的放电现象[3-4]，充分利用了真空灭弧室的内部空间。

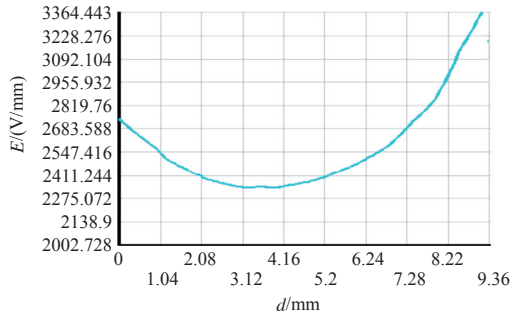
主屏蔽罩半径对电场分布的影响

上文分析的真空灭弧室主屏蔽罩长度为114 mm，两端倒角部分曲率半径为2.5 mm，厚度为1 mm。文中通过改变主屏蔽罩的半径，绘制出静触头沿面的电场强度变化曲线以及波纹管屏蔽罩和主屏蔽罩倒角之间的电场强度渐变曲线，如图3所示。

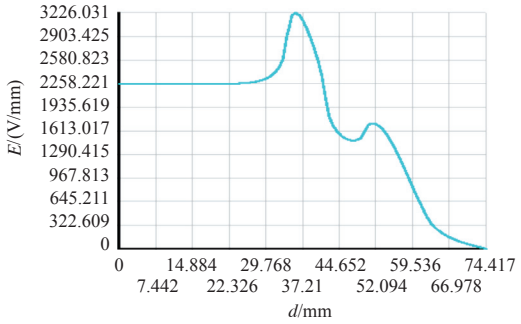
从图3中的三幅触头沿面电场强度的曲线变化图中可以观察到，当主屏蔽罩半径分别为54 mm、



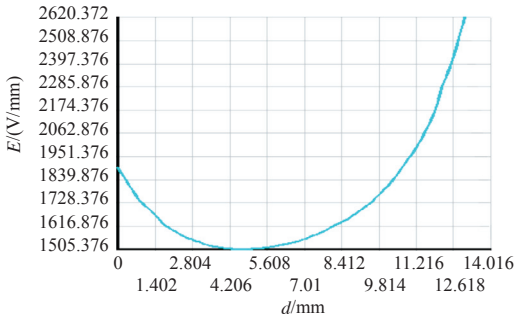
（a）R_{54}触头沿面场强



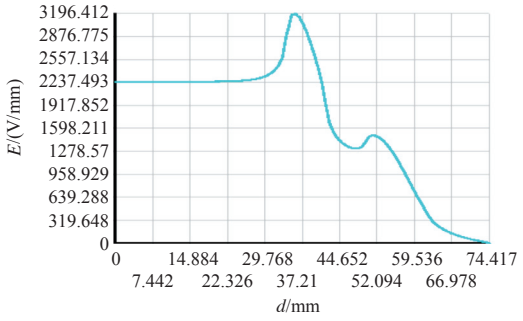
（b）R_{54}两屏蔽罩之间场强



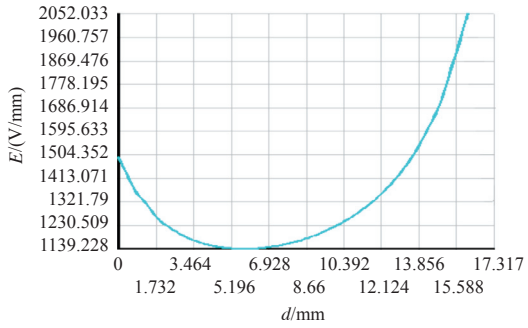
（c）R_{57}触头沿面场强



（d）R_{57}两屏蔽罩之间场强



（e）R_{60}触头沿面场强



（f）R_{60}两屏蔽罩之间场强

图3　触头沿面以及两屏蔽罩之间的电场渐变曲线

57 mm和60 mm时，触头沿面对应的电场强度最大值分别是3 295.40 V/mm、3 226.03 V/mm和3 196.41 V/mm。对比以上场强变化趋势可以发现，随着主屏蔽罩半径的增大，触头沿面的电场强度逐渐变小；同时触头沿面的最大电场强度均出现在横坐标值为34左右的位置，而此处恰为触头表面倒圆角处；虽然三个主屏蔽罩半径的尺寸不同，但场强在触头沿面的变化趋势都大致相同。

从图3中的三幅波纹管屏蔽罩和主屏蔽罩弯角之间的电场渐变曲线可以得到两屏蔽罩之间的最小电场强度和最大电场强度，如下表所示。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表　两屏蔽罩之间的最小场强和最大场强

R/mm	E_{min}/（V/mm）	E_{max}/（V/mm）
54	2 002.73	3 364.44
57	1 505.38	2 602.37
60	1 139.23	2 052.03

从图3可以看出，电场强度从波纹管屏蔽罩向主屏蔽弯角处的变化趋势为先减小后增大，且变化趋势较为平缓，两屏蔽罩之间均匀的电场过渡曲线有利于二者之间的绝缘水平。

从表中还可以发现，随着主屏蔽罩半径的增大，两屏蔽罩之间的最小电场强度和最大电场强度同时变小，且变化较为明显。同时将三组半径中的E_{max}与E_{min}作差后可得到场强差值分别为1 361.71 V/mm、1 097.00 V/mm和912.80 V/mm，而较小的电场强度差值可有效防止两屏蔽罩之间的击穿现象产生[5]。

在进行真空灭弧室的设计时，还应该充分考虑到主屏蔽罩对动静触头在开断过程中所产生的电弧生成物的吸收作用[6]。若半径过大，则主屏蔽罩对电弧生成物的吸收作用将减弱[7]，因此不利于真空开关的开断。

结束语

本文利用有限元软件ANSYS对40.5 kV真空灭弧室在不同主屏蔽罩半径情况下的内部电场进行计算，得到其电场和电位分布。通过对计算结果的分析可得到以下结论：

1）当主屏蔽罩半径不断增大时，其电场强度随之变小；但当其半径增大到一定程度时，场强将不再随之减小。同时主屏蔽罩半径的增大对其电位分布的影响可以忽略。

2）波纹管屏蔽罩和主屏蔽罩之间的电场强度随着主屏蔽罩半径的增大而减小，且场强过渡曲线比较平缓，因此降低了两屏蔽罩之间的击穿概率。

3）通过对比三种不同尺寸的主屏蔽罩半径的电场计算结果，以及综合考虑到主屏蔽罩对电弧生成物的吸收作用，最终得出结论：该40.5 kV真空灭弧室主屏蔽罩的最佳半径为57 mm。

参考文献

[1] 王季梅，钱予圭．论高压真空灭弧室和真空断路器的产品开发 [J]．高压电器，2003，39 (1)：65-67．

[2] 程少勇，刘志远，李新华，等．基于面积效应的真空灭弧室触头间隙击穿特性研究 [J]．高压电器，2007，43 (3)：161-168．

[3] 李旭．计算电位悬浮导体电场问题的有限元外推法 [J]．电气应用，2006，25 (2)：19-21．

[4] Kato K，Xham X，Okubo H．Insulation optimization by electrode contour modification based on breakdown area/volume effects [J]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2001，8 (2)：162-167．

[5] 修士新，王季梅．关于高电压等级真空灭弧室研究与开发 [J]．高电压技术，2003，29 (12)：7-9．

[6] Okawa M，Shioiri T，Okubo H，et al．Area effect on electrical breakdown of copper and stainless in vacuum [I]．IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，1998，23 (1)：77-81．

[7] 阮江军，舒胜文，黄道春，等．串联真空灭弧室工频预击穿电流的自均压作用 [J]．高电压技术，2010，36 (6)：1353-1538．

（收稿日期：2015－01－12）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net