

高压直流GIS中气固绝缘介质的绝缘特性研究

张博、王之军、姚永其、张豪、刘亚培

平高集团有限公司，河南，平顶山



国家电网
STATE GRID

平高集团有限公司
PINGGAO GROUP CO., LTD.

简介

随着对高压直流（HVDC）输电技术的发展，直流气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）因其具有占地空间小、可靠性高、互换性强等特点得到越来越多的关注。与交流不同，直流GIS绝缘系统的电场分布取决于电介质的电导率。在绝缘系统电场由容性转化为阻性的同时，电荷在气固介质交界面积聚而改变了原有电场，导致其沿面闪络特性下降，制约着直流GIS的工程应用。本文提出了一种适用于直流GIS气固绝缘电场分布和表面电荷积累计算的数值模型。该研究将有助于通过减小关键区域电场和最小化局部表面电荷积累来改善直流GIS中绝缘设计，用于优化绝缘子的几何形状和材料特性，验证设计变更。

理论依据

1、固体绝缘介质区域

在固体绝缘材料中，电流密度由传导电流和位移电流两部分组成，如公式（1）所示，联合公式（2）和（3）即可求得固体区域内电荷密度分布随时间变化规律。可以看出，直流下固体内的电荷密度取决于材料介电常数和电导率。

$$J_I = \sigma_{VI}(-\nabla\phi) + \frac{\partial D_I}{\partial t} \quad (1) \quad \rho = -\epsilon\Delta\phi \quad (2) \quad \nabla \cdot J_I = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

2、气体绝缘介质区域

在气体区域，由于气体中正负离子在电场作用下的漂移以及浓度梯度造成的扩散，其电导率呈高度非线性。气体正负离子漂移方程如式（4）（5）所示。

$$\frac{\partial n^+}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}^+}{\partial t} - K_r n^+ n^- + \nabla \cdot (D^+ \nabla n^+) + \nabla \cdot (n^+ b^+ \nabla \phi) - \nabla \cdot (n^+ V_G) \quad (4)$$

$$\frac{\partial n^-}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}^-}{\partial t} - K_r n^+ n^- + \nabla \cdot (D^- \nabla n^-) - \nabla \cdot (n^- b^- \nabla \phi) - \nabla \cdot (n^- V_G) \quad (5)$$

3、气固介质界面

由于气固介质界面存在电导率及介电常数的不连续情况，电荷必然在边界积聚，从而畸变了原有的电场，对直流下绝缘子的绝缘特性带来危害。积聚的电荷由公式（6）表达，图1给出了界面的示意图。

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = J_{In} - J_{Gn} - \nabla \cdot (\sigma_{VS} E_r) \quad (6)$$

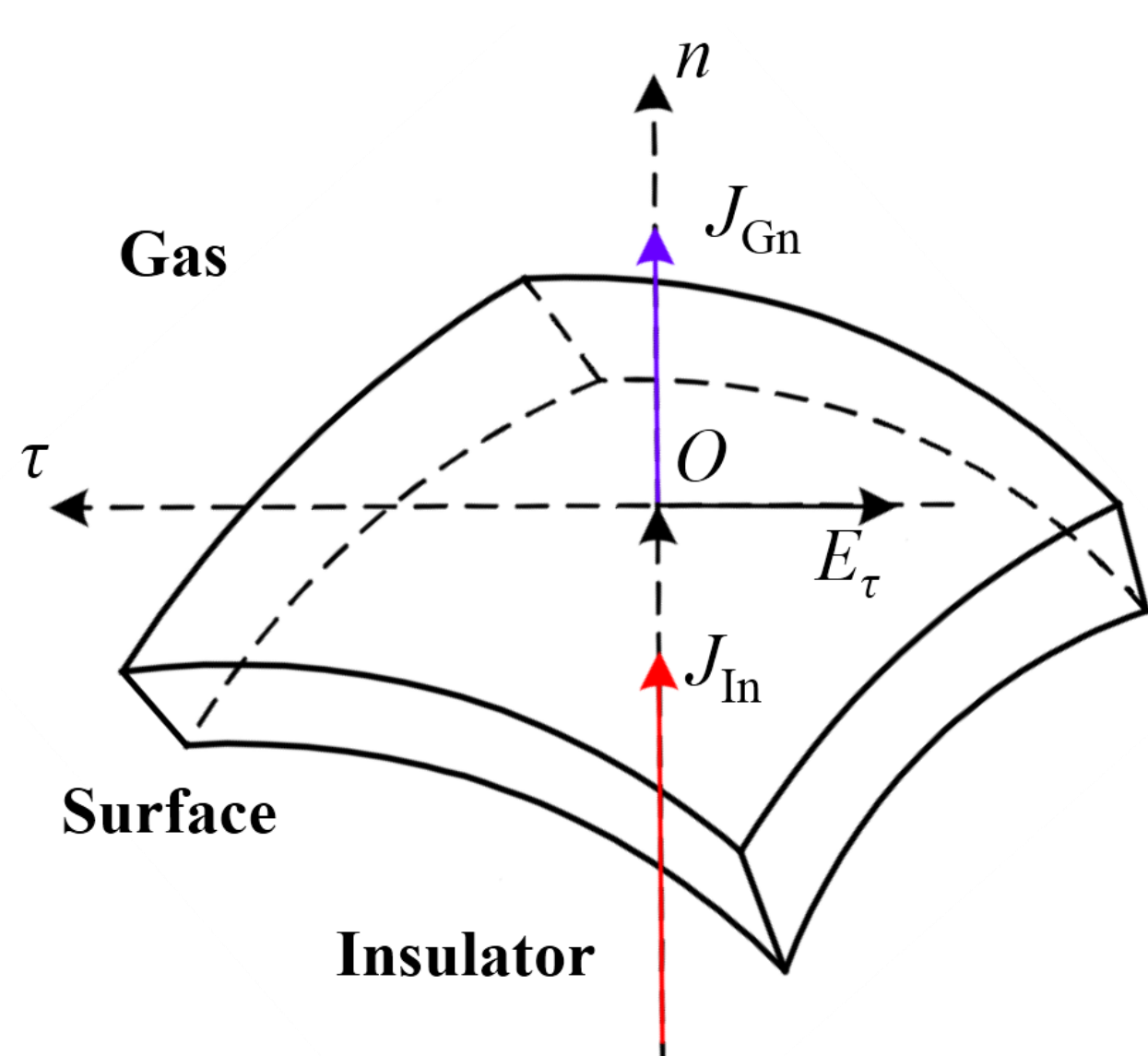


图1 气固介质界面示意图

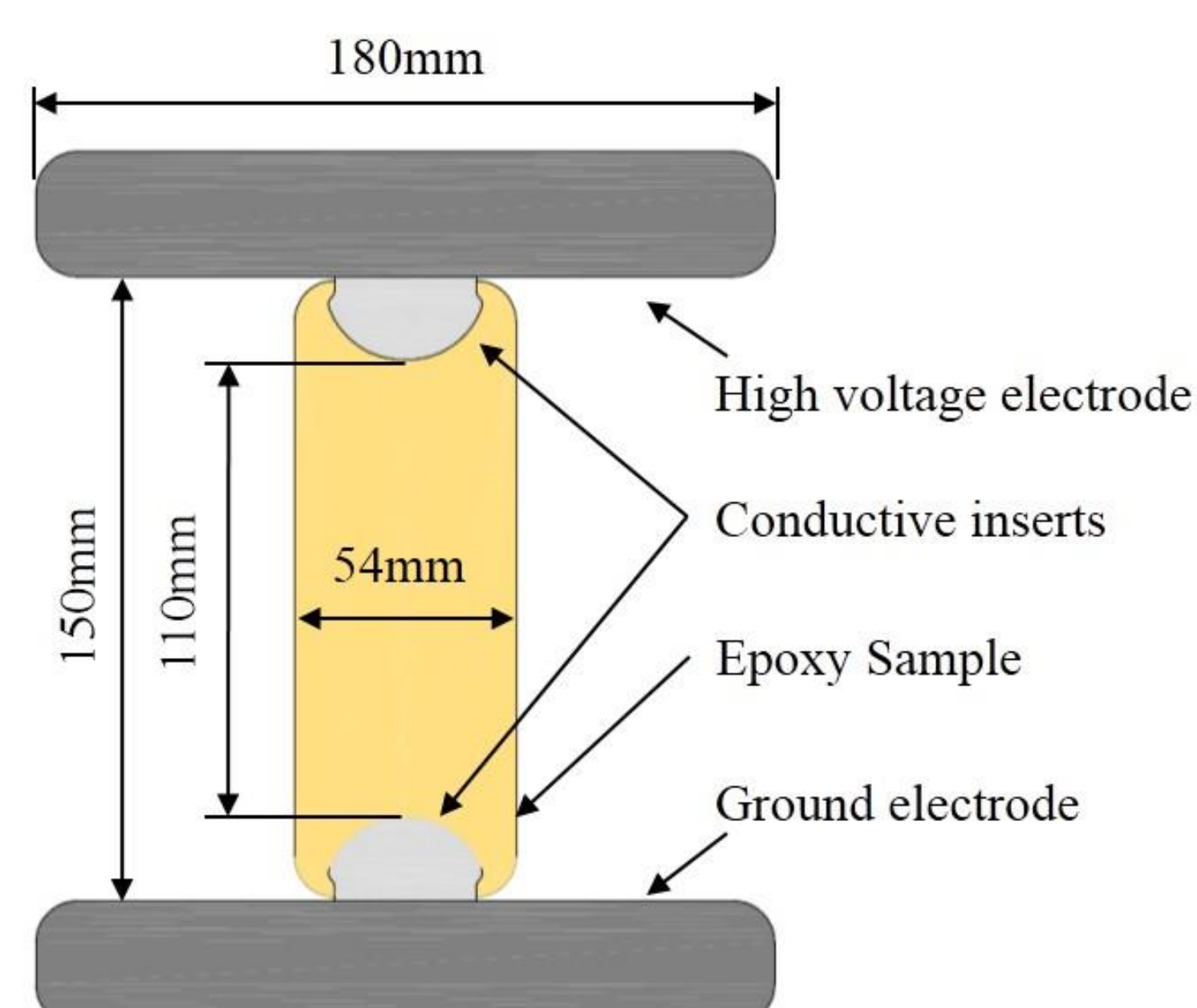


图2 几何模型示意图

仿真研究

1、几何模型和初始容性电场分布

研究针对的几何模型如图2所示，由高低压电极、绝缘子和金属嵌件组成，并放置在绝对压力为0.4MPa的SF₆气体中，通过对加载高压电源至高压电极形成直流电场。在加压初始时刻，整个模型属于容性电场。其模型布置和容性电力线分布如图3所示。可以看出绝缘子不同位置对气体中电荷的吸引情况。

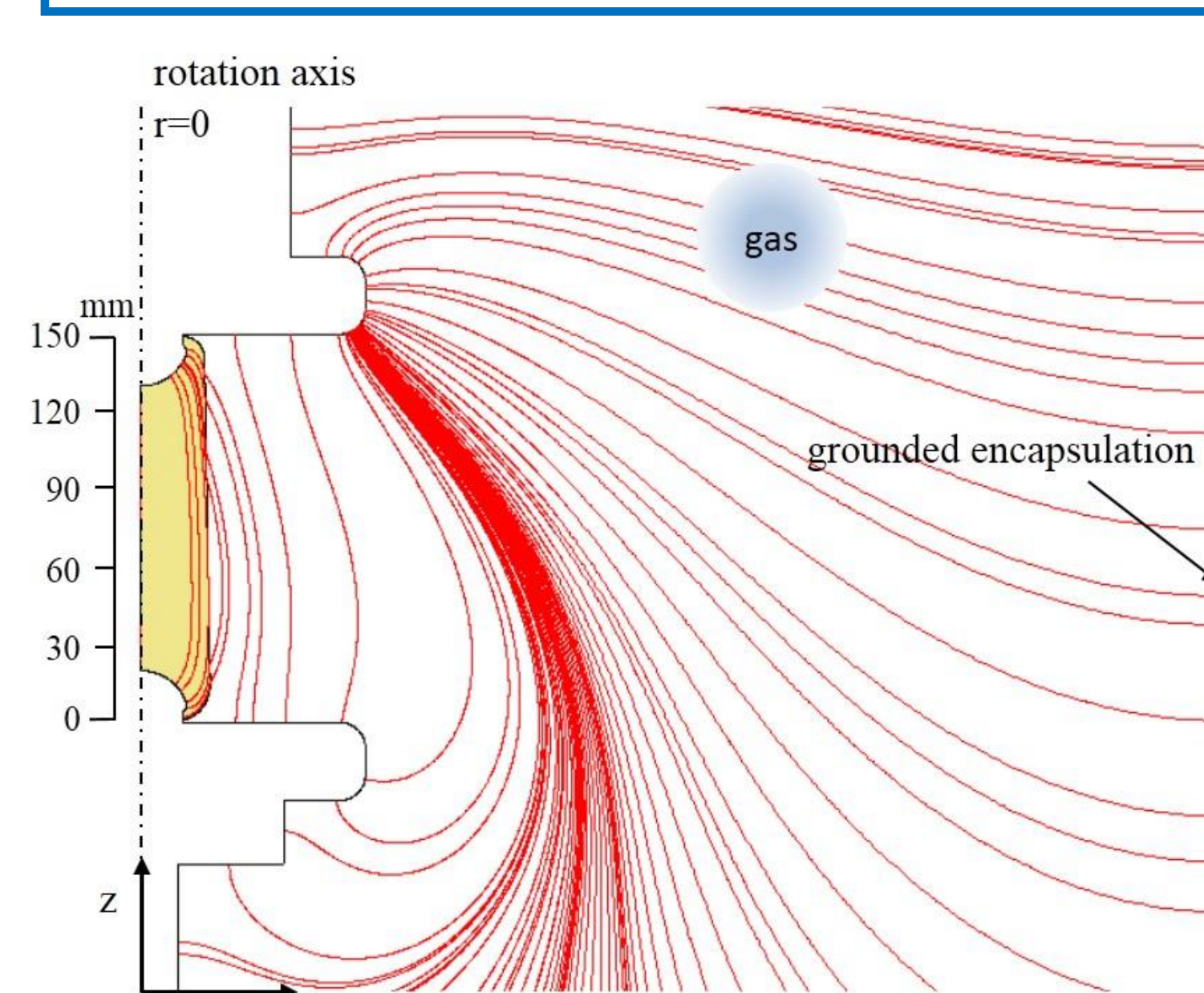


图3 初始容性电场分布

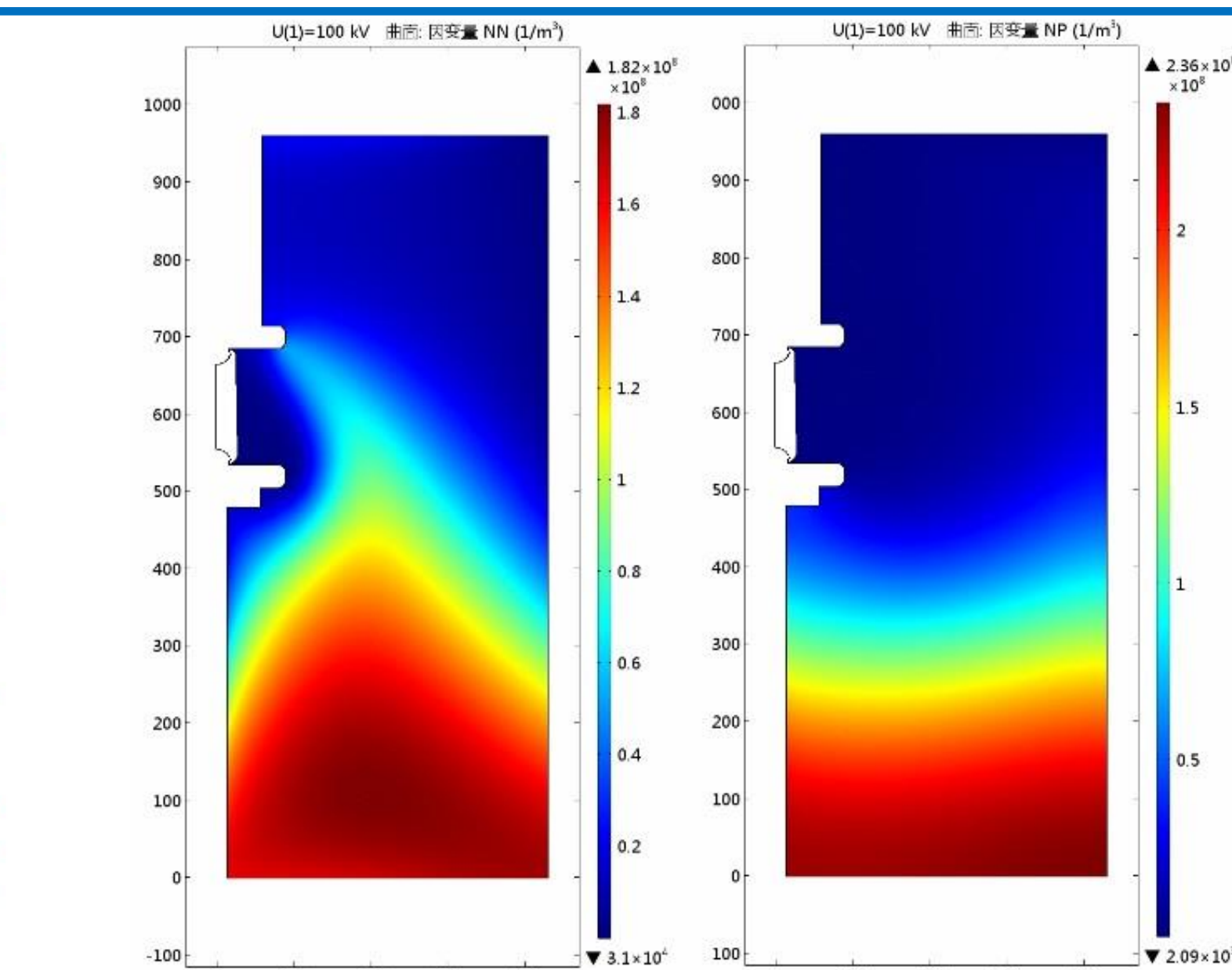


图4 负离子和正离子浓度

2、直流电场仿真结果

稳定后的正负离子浓度分布如图4所示，可以看出气体区域内不同区域的离子浓度，从而获得气体非均匀的电导率。进一步可以获得绝缘子表面电位和表面电荷随加压时间的变化情况如图5、6所示。可以看出随时间变长，电荷积聚增多，在10⁷s（约3000h）时达到稳定。

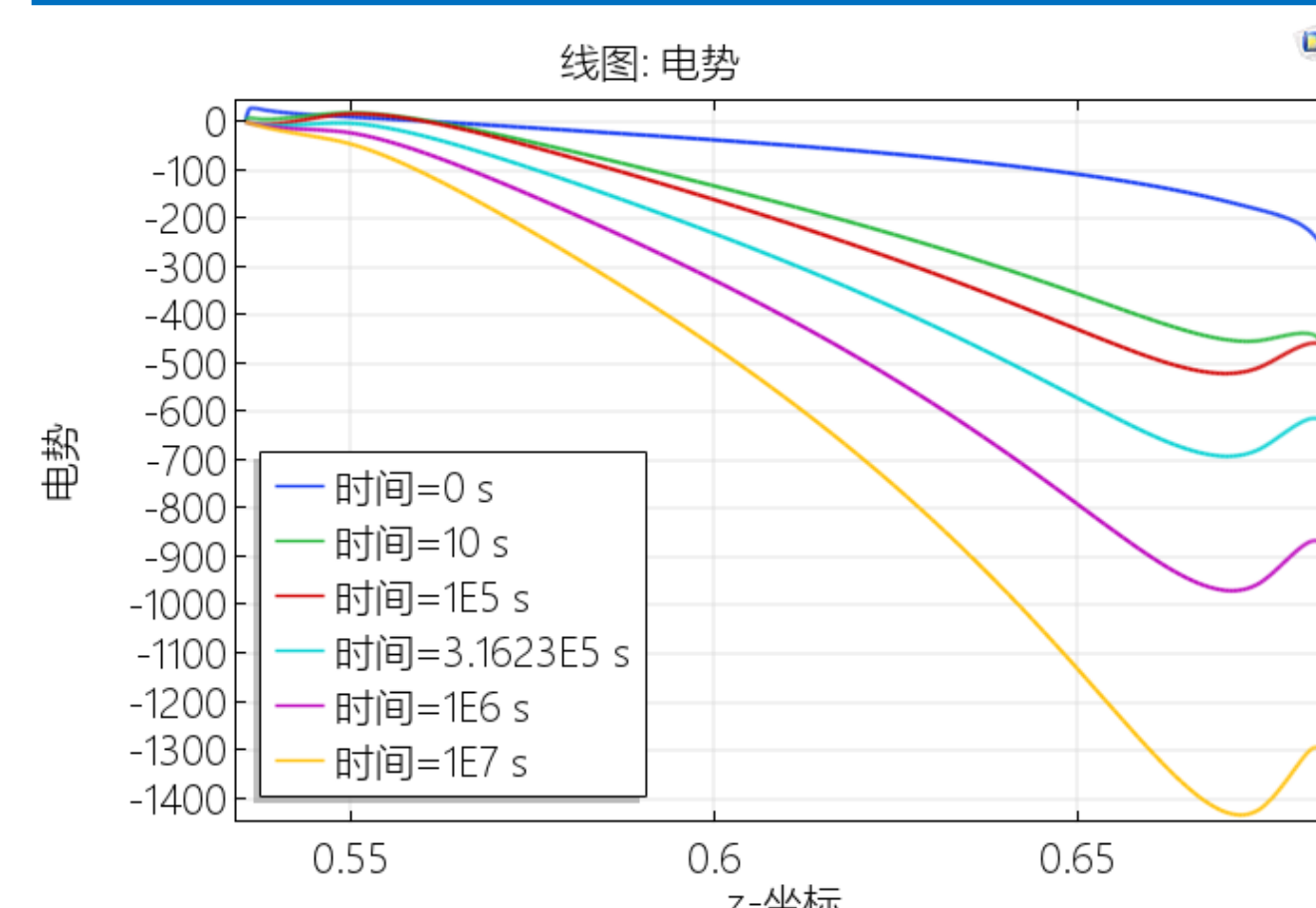


图5 表面电位随时间变化

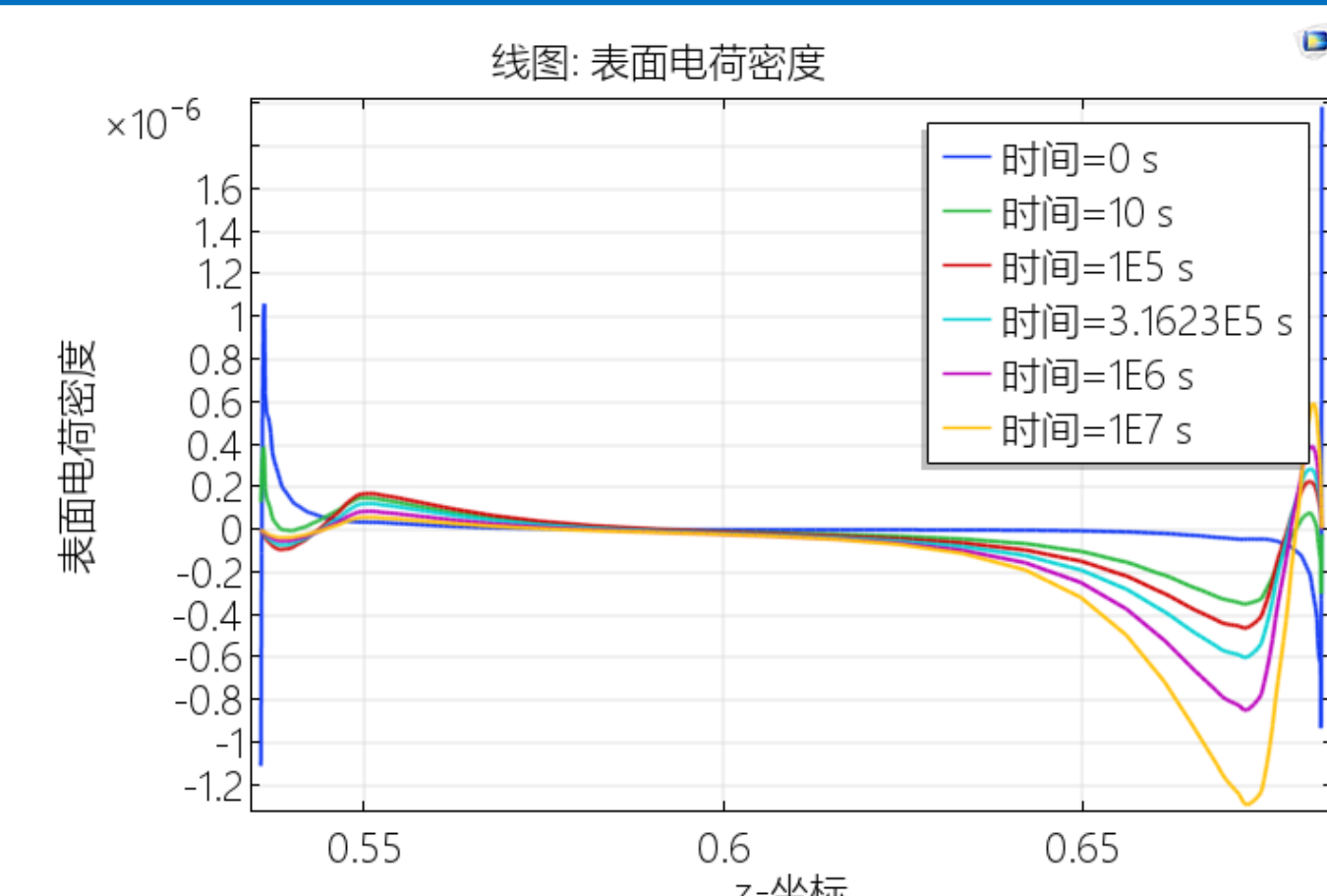


图6 表面积聚电荷随时间变化

结语

本研究采用COMSOL建立了适用于直流GIS气固绝缘系统电场分布和表面电荷积累的数值模型。基于该模型可以进一步研究气体中离子数目、固体电导率、表面电导率等关键设计因素对绝缘特性的影响规律，从而指导优化设计直流GIS绝缘子形状和材料特性。

参考文献

- [1] A. Winter and J. Kindersberger. "Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 5, pp. 1732-1739, 2012.
- [2] Straumann U, Schüller M, Franck C M. Theoretical investigation of HVDC disc space charging in SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2196-2205.
- [3] B. Lutz, J. Kindersberger, "Surface Charge Accumulation on cylindrical polymeric model Insulators in air: Simulation and Measurement", Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 6, pp. 2040-2048, 2011.