

中图分类号: TM852

密 级: 公开

UDC: \_\_\_\_\_

本校编号: \_\_\_\_\_

兰州交通大学

# 硕 士 学 位 论 文

论文题目: 沙尘地区染污绝缘子电场  
分布的仿真研究

研究生姓名: 陈志东 学号: 0212386

学校指导教师姓名: 张友鹏 职称: 教授

申请学位等级: 工学硕士学位 专业: 电力系统及其自动化

论文提交日期: 2015.6.12 论文答辩日期: 2015.6.8

# 硕士学位论文

## 沙尘地区染污绝缘子电场分布的仿真研究

### Simulation Research on Electric Field Distribution Along Polluted Insulator in Sand-dust Region

作者姓名：           陈志东          

学科、专业：           电力系统及其自动化          

学    号：           0212386          

指导教师：           张友鹏教授          

完成日期：           2015年4月18日          

兰 州 交 通 大 学  
Lanzhou Jiaotong University



## 摘 要

我国西北地区风沙较大，沙尘暴频繁发生，这给铁路的安全运行带来很大影响。在沙尘暴的作用下沉积在绝缘子表面的沙尘量严重增大，沉积的沙尘使绝缘子工作环境发生变化。一旦绝缘子工作环境发生变化其电场分布将会发生畸变，绝缘子沿面电场大于空气击穿场强时，闪络事故可能发生。因此分析接触网复合绝缘子在沙尘地区染污后的沿面电场分布，可为沙尘地区绝缘子闪络机理的研究提供一定的参考。

目前接触网中大量使用腕臂棒形柱式复合绝缘子，因此本文选用接触网常用 FQBG-25 型号腕臂棒形柱式复合绝缘子为分析对象，在静电场中建立了覆沙绝缘子模型，在电准静态场中建立了绝缘子表面出现干燥带的仿真模型。采用人工截断法构造合理的闭合区域，这样就满足了有限元法分析计算绝缘子电场分布的条件。由于沙粒几何尺寸很小且数量较大，普通计算机的内存很难满足计算要求，因此根据模型的结构特点建立合理的简化模型，既满足了结果的准确性又节约了计算时间。本文利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件对绝缘子表面出现沙粒和干燥带两种染污情况下，绝缘子沿面电场畸变情况进行仿真分析。

仿真结果表明：接触网复合绝缘子表面覆有不同粒径的沙粒时，对绝缘子电场强度畸变程度不同；随粒径的增大，沙粒处绝缘子电场强度也小幅增大；绝缘子沿面电场受带电沙粒的影响较为明显，电场强度随着沙粒带正负电荷量绝对值的增大而增大；绝缘子沿面电场分布受沙粒极性和覆着位置的影响明显；伞裙上表面，负电量沙粒对电场畸变程度大于正电荷量沙粒；相反，伞裙下表面，正电荷量沙粒对电场的畸变程度高于负电荷量沙粒。接触网棒形柱式复合绝缘子伞裙间柱体处泄漏电流最大，最易出现干燥带；伞裙上、下表面干燥带处的场强最大值，随着干燥带宽度的增大而增大，且最大值出现在靠近柱体侧干燥带端部，两个伞裙之间的柱体上场强的最大值因干燥带宽度的增大反而减小；干燥带数目对场强最大值影响较为明显，随着伞裙上干燥带数目的增多，场强最大值显著增大，而柱体上干燥带数目的增多，场强最大值有所降低。

**关键词：**沙尘地区；染污；接触网绝缘子；有限元法；电场分布

**论文类型：**应用技术研究

## Abstract

It is very windy and dusty in northwest of China, sandstorm occurs frequently. The sandstorm has significant impact on the safe operation of the railway. Under the effect of sandstorm the amount of sand deposited on the insulator surface is increased seriously, the work environment of insulator is changed by sand deposited on the insulator surface. Once the work environment of insulator is changed, electric field distribution of insulator is distorted. Flashover accident could happen when the electric field along the surface of insulator is greater than field strength of air breakdown. Therefore, the analysis of electric field distribution along the surface of polluted catenary composite insulator catenary in sand-dust region can provide a reference for the study on insulator flashover mechanism.

Currently rod-column post composite insulator is extensively used in catenary, Therefore catenary rod-column post composite insulator of FQBG-25 is selected as the analysis object. The model overlying sand insulator is established in the electrostatic field and the model of the insulator with dry band is established in the quasi-static electric field. The closed area is set reasonably by the artificial truncation method, this satisfies the condition for finite element analysis to calculate the electric field distribution of insulator. Due to the small geometry of sand and large amount, ordinary computer's memory is difficult to meet the computational demand, therefore rational simplified models based on the structural characteristics are established. So both the accuracy of the results and save computing time are meet. In this thesis, the software COMSOL Multiphysics based on the finite element is used to analy distortion of electric field along the insulator surface, under two kinds of conditon that sand and dry band on the surface.

The results of simulation show that sand grains with different size distort electric field along the surface of insulator differently. Electric field strength is increased with increasing of sand grain size. The electric field is affected obviously by charged sand grains. When the amount of charges taken by sand grains increase, the degree of distortion is increased correspondingly. The degree of distortion of the electric field is affected obviously by the polarity and position of sand grains. On the upper surface of sheds, electric field increased by negative charged sand grains is heavier than sand grains with positive charge. Conversely, on the lower surface of sheds, electric field increased by positive charged sand grains is heavier than sand grains with negative charge. Rod pillar cylinder between two sheds has maximum leakage current and dry band is generated easily. The maximum field strength is at dry band on the upper or lower surface of sheds. With the increasing of dry band width, the maximum electric field at the surface of the sheds appears at the ends of the dry band, however, field strength at cylinder is decreased. The amount of dry band has an obvious

influence on maximum field strength. With the quantity of the dry band at the upper and lower surfaces of sheds increased, the maximum electric field at the dry band is elevated. However, with the quantity of the dry band at the cylinder, the maximum field strength is decreased.

**Key Words: Sand-dust region, Polluted, Catenary insulator, Finite element method, Electric field distribution**

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract .....	II
目 录.....	IV
1 绪论.....	1
1.1 选题背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.3 主要研究工作内容.....	3
2 绝缘子电场分布的计算原理.....	5
2.1 静电场原理.....	5
2.2 电准静态场原理.....	7
2.3 有限元法原理.....	9
2.4 COMSOL Multiphysics 有限元软件.....	10
2.4.1 软件介绍.....	10
2.4.2 仿真过程.....	11
2.5 小结.....	12
3 洁净接触网绝缘子电场分布.....	13
3.1 洁净绝缘子仿真模型的建立.....	13
3.1.1 FQBG-25 型棒形柱式复合绝缘子.....	13
3.1.2 人工截断法的应用.....	14
3.1.3 网格剖分.....	15
3.2 绝缘子电位分布.....	16
3.3 绝缘子电场分布.....	17
3.4 绝缘子伞裙电位和电场分布.....	18
3.5 计算方法的验证.....	21
3.6 小结.....	21
4 表面覆沙时绝缘子沿面电场分布计算.....	22
4.1 覆沙绝缘子仿真模型的建立.....	22
4.2 沙粒粒径对绝缘子沿面电场分布的影响.....	23
4.3 沙粒带电量对绝缘子沿面电场分布的影响.....	25
4.4 沙粒的极性和位置对绝缘子沿面电场分布的影响.....	27

4.5 小结 .....	30
5 表面出现干燥带时绝缘子沿面电场分布计算 .....	31
5.1 表面出现干燥带绝缘子仿真模型的建立 .....	31
5.2 干燥带最容易出现区域的分析 .....	33
5.3 干燥带宽度对绝缘子沿面电场分布影响 .....	33
5.4 干燥带数目对绝缘子沿面电场分布影响 .....	37
5.5 小结 .....	40
结 论 .....	41
致 谢 .....	42
参考文献 .....	43
攻读学位期间的研究成果 .....	46

# 1 绪论

## 1.1 选题背景和意义

近年来,我国西北地区沙漠化土地面积不断增加,强烈的沙尘暴时常发生<sup>[1,2]</sup>。沙尘暴引起的电网绝缘子闪络事件频繁报道,绝缘子闪络将导致电网无法正常运营<sup>[3-7]</sup>。在国外,沙尘地区绝缘子闪络事故常有发生,因此国际高压绝缘领域已经开始研究沙尘天气下绝缘子闪络的机理<sup>[8-10]</sup>。

接触网是用来向铁路机车提供电能的高压线路,接触网的架设高度低,很容易受到列车高速运行时道床扬起的沙尘以及沙尘暴的污染。故接触网绝缘子受到沙尘污染较严重<sup>[11,12]</sup>。近年来,沙尘地区接触网绝缘子闪络事故多次发生造成了铁路不能正常运营,导致了一定的经济损失。2002年,因沙尘暴引起的绝缘子闪络致使从乌鲁木齐到郑州的T198次列车晚点22小时;2006年,新疆吐鲁番特大沙尘暴导致T70次列车到达北京时晚点32小时;2006年,从乌鲁木齐开往其它城市的9趟列车,因沙尘暴的影响在兰州停滞长达26个小时;2010年,由乌鲁木齐始发的列车在甘肃省民勤县遭遇沙尘暴的侵袭导致列车晚点;2013年由乌鲁木齐开往济南因沙尘暴侵袭导致列车晚点到达。

在接触网中绝缘子起到重要作用,它将接触网中的高压带电体与大地之间进行绝缘同时其固有的材质和结构也起到固定和支撑的作用,然而绝缘子裸露安装在室外,容易受到自然天气的污染和侵袭。沙尘地区接触网绝缘子表面污秽的沉积量因沙尘暴的出现不断增加,且沙粒与大地的摩擦和沙粒与沙粒间的摩擦都会使沙粒带上电荷<sup>[13]</sup>,绝缘子沿面电场的畸变很大程度上因表面污秽的改变而改变。当绝缘子表面局部电场达到30kV/cm(即空气的临界击穿场强),绝缘子表面局部电弧将出现,当局部电弧跨越绝缘子的结构高度时,绝缘子将发生闪络进而失去绝缘作用。因此绝缘子闪络的根本原因是电场畸变<sup>[14,15]</sup>。所以,研究沙尘地区接触网绝缘子染污情况下其沿面电场的畸变程度是必要的。

主要有以下三种方法求得绝缘子电场分布:现场测量、解析法、数值计算法。现场测量高成本,容易受到外界因素干扰;解析法分析过程十分复杂,对于结构复杂的几何模型很难分析,需要大量时间;而数值计算法得到了高压绝缘领域的广泛应用,特别是数值计算中的有限元法<sup>[16-18]</sup>。由于绝缘子几何形状复杂,介质多样,前两种方法很难满足工程分析的需要,而数值计算中的有限元法能很好的处理这类电场问题,并且随着计算机的发展,基于有限元法的诸多软件相继出现,这大大节省了计算时间,提高了计算效率。因此利用数值计算法求解绝缘子电场问题已经成为高压绝缘领域的趋势<sup>[19-23]</sup>。

随着我国西部电气化铁路的不断发展,更多的接触网要跨越沙尘地区,因此更多的

绝缘子要受到沙尘的侵害。通过进一步的研究和分析沙尘地区染污绝缘子的电场分布，可为沙尘地区接触网绝缘子闪络机理的研究提供理论参考，更好的保障沙尘地区铁路系统的正常运营。

## 1.2 国内外研究现状

目前国内外对沙尘地区沙尘暴的研究有两方面：在国内，通过数值计算的方法研究沙尘对绝缘子电场强度的影响较少，主要研究方面为风沙起电现象。国外，学者主要通过试验对在沙尘条件下绝缘子闪络特性进行研究。因沙尘地区覆着在绝缘子表面沙粒和表面的干燥带均可导致绝缘子沿面电场产生畸变，目前国内外在此相关方面研究如下：

Gill 在沙尘尘暴过境时观察到了有电火花出现和强电场<sup>[24]</sup>。Latham 认为导致正负电荷分离的主要原因是沙粒间非对称摩擦产生的温度梯度，进而出现带有不同极性和电量的沙粒<sup>[25]</sup>。中科院屈建军经过大量的试验得知沙粒摩擦后所带正负电荷量的最大值分别是负电荷量为 $-304\mu\text{C}/\text{kg}$ ，正电荷量为 $158\mu\text{C}/\text{kg}$ ，并提出非对称摩擦是导致沙粒带电的主要原因<sup>[26,27]</sup>。

国内外通过有限元数值计算的方法对雨滴、冰、湿污等污秽对电力系统绝缘子电场分布影响的研究比较多，而针对污秽为沙粒和干燥带且绝缘子为接触网绝缘子的电场分布研究甚少。目前重庆大学和西安交通大学正在研究沙尘对电力系统绝缘子的影响。

司马文霞等学者选用平板作为研究模型，经过大量的实验得出沙尘对绝缘子闪络和放电的影响情况，通过有限元软件建立了平板仿真模型，通过仿真得出平板表面覆有沙粒、周围空气中悬浮沙粒以及平板表面出现无沙带三种情况模型电场分布情况<sup>[28-33]</sup>。分析出当绝缘子表面沙粒沉积量少时，绝缘子沿面电场的垂直分量使得沉积在绝缘子表面的沙粒带上了电荷，在沿面电场法向分量的作用下发生移动，在沙层中出现无沙带。由于平板模型相对简单，与真实复杂的绝缘子模型结构存在较大的差异，未能很好的反映沙污情况下真实绝缘子的电场分布。

重庆大学程浩应用 COMSOL Multiphysics 有限元软件计算了沙尘作用下绝缘子沿面电场的变化<sup>[34]</sup>。结果表明：当绝缘子表面沉积均匀的沙层时，绝缘子电场近似无变化；而在均匀的沙层中出现无沙带时，绝缘子在无沙带处的沿面电场明显发生畸变；空气中无电沙粒和带电沙粒对绝缘子沿面电场有着不同程度的影响；中性沙粒对电场的作用微小，相反带电沙粒大幅作用于绝缘子沿面电场，使电场出现大的畸变。但文中选用的研究对象为瓷绝缘子，与柱式复合绝缘子的几何形状存在一些差别，所以未能够反映出沙粒对复合绝缘子电场畸变情况。

西安交通大学彭宗仁基于有限元仅简单的分析了绝缘子电场受其周围空气中悬浮

的带电沙粒影响明显，同时说明了导电属性不同的沙粒对绝缘子电场畸变影响不同<sup>[35]</sup>。仿真结果仅做了简单分析，未进一步深入研究。

兰州交通大学赵珊鹏等学者选用接触网瓷绝缘子为分析对象，应用有限元软件建立了沙尘天气下绝缘子周围空气中悬浮不同极性，不同数量的沙粒时对绝缘子电场分布的影响，结果表明：沙粒的数量多少，沙粒的带电极性均可导致绝缘子沿面电场产生不同程度的畸变<sup>[36,37]</sup>。但作者选择的研究对象为瓷绝缘子且仅分析了绝缘子周围空气中悬浮带电沙粒的情况，未考虑绝缘子表面出现带电沙粒的情况。

针对于绝缘子表面干燥带对其电场分布的影响的研究，国内外大多采用电力系统瓷绝缘子为研究对象。

西安交通大学高博等学者根据实际尺寸以单片盘式瓷绝缘子为分析对象建立了有限元仿真模型，研究绝缘子表面的干燥带的分布位置、干燥带的宽度、干燥带的数目以及干燥带分布的角度对绝缘子沿面电场的影响。仿真结果得出干燥带分布的位置、干燥带宽度等因素均对绝缘子电场畸变有影响<sup>[38]</sup>。

华北电力大学徐志钮等学者应用有限元法将 110kV 瓷支柱绝缘子做为研究对象，分析干燥带最容易出现的区域以及干燥带的位置、宽度、数目、电阻率对电场分布的影响，结果表明由于几何形状较盘式瓷绝缘子不同，所以对绝缘子电场分布畸变也有差异<sup>[39]</sup>。

天津大学王振华等人研究了硅橡胶绝缘子表面干燥带放电与气压的影响，通过实验主要研究了硅橡胶绝缘子表面形成干燥带的原理以及表面干燥带放电的频率特征，证明了硅橡胶绝缘子表面能出现干燥带，且干燥带的出现对绝缘子表面放电有影响<sup>[40]</sup>。

从以上的研究成果可知在研究对象上大多采用简单或者瓷绝缘子的较多，而针对复合绝缘子的研究较少，且大多研究电力系统中的绝缘子，而针对接触网特殊的工作环境下的复合绝缘子的研究较少。从污秽类型上考虑，现有的成果并未研究接触网复合绝缘子表面覆着带电沙粒时沙粒的粒径、沙粒的电荷极性和位置、沙粒的带电量等重要因素对绝缘子沿面电场的影响，同时对接触网复合绝缘子表面最容易出现干燥带的区域，以及干燥带的宽度、数目等因素对沿面电场的畸变情况的研究还未见报道。

### 1.3 主要研究工作内容

本文以电气化铁路接触网专用的 FQBG-25/12 型号腕臂棒形复合绝缘子为研究对象，结合已有文献未考虑的污秽影响因素，基于静电场和电准静态场有限元法建立覆沙和表面出现干燥带的绝缘子数值计算仿真模型。应用 COMSOL Multiphysics 软件计算分析绝缘子伞裙表面覆着带电沙粒和表面出现干燥带两种染污情况下对绝缘子沿面电场的影响，主要研究内容如下：

- (1) 分析洁净接触网复合绝缘子整体和各个伞裙的电位和电场分布。
- (2) 分析当绝缘子表面覆着沙粒时，沙粒的粒径、沙粒带电量、沙粒的带电极性和覆着位置对绝缘子沿面的电场分布的影响。
- (3) 分析绝缘子表面出现干燥带时，干燥带最容易在绝缘子表面形成的区域、干燥带宽度、数目等对绝缘子沿面电场分布的影响。

## 2 绝缘子电场分布的计算原理

工频交流电下,电压的变化很慢,绝缘子结构高度相对于工频下电磁波的波长甚小,如式 2.1 所示,因此在任一瞬间的绝缘子电场均可认为是稳定的,故可选择稳态场对绝缘子电场分布进行仿真分析<sup>[41,42]</sup>。

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{50} = 6 \times 10^6 \quad (2.1)$$

其中,  $\lambda$  为工作电压的波长,单位 m;  $c$  为电磁波的速度,单位 m/s;  $f$  为电压频率,单位 Hz。

### 2.1 静电场原理

静电场为相对于观察者是静止的,且量值不跟随时间的变化而变化的电荷所产生的电场。高压绝缘结构研究常常要遇到静电场问题,因此为了能很好完成电力设备的优化和设计,基于静电场的数值分析计算起到至关重要的作用<sup>[40,41]</sup>。

静电场积分方程如下:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \oint_V \rho dV$$

$$\oint_l \mathbf{E} dl = 0$$

其中,电场强度为  $\mathbf{E}$ ,单位是 V/m;电通量密度为  $\mathbf{D}$ ,单位是 C/m<sup>2</sup>;闭合的有向曲面为  $S$  表示;电荷体密度为  $\rho$ ,单位是 C/m<sup>3</sup>;  $S$  限定的体积为  $V$ ;任意闭合的有向曲线为  $l$ 。

静电场微分方程如下:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0$$

其中,在直角坐标系中算子  $\nabla$  写成

$$\nabla = \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z}$$

其中,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的单位矢量分别为  $\mathbf{e}_x$ 、 $\mathbf{e}_y$ 、 $\mathbf{e}_z$ 。

媒质构成方程描述了场量与媒质特性关系:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.3)$$

其中，媒质的介电系数  $\varepsilon$ ；真空介电系数为  $\varepsilon_0$ ；相对介电系数为  $\varepsilon_r$ 。

一个标量函数  $\varphi$  表示电场强度  $\mathbf{E}$ ：

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (2.4)$$

其中，标量函数  $\varphi$  称为静电场的标量电位函数，单位是 V。

将式 2.3 和式 2.4 代入式 2.2 中，可得：

$$\nabla \cdot \varepsilon(-\nabla\varphi) = \rho$$

对于均匀媒质，可得：

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.5)$$

$\nabla^2$  称为拉普拉斯算子，式 2.5 即为静电场电位  $\varphi$  的泊松方程，在直角坐标系中有：

$$\nabla^2\varphi = \nabla \cdot \nabla\varphi = \frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}$$

电位  $\varphi$  的拉普拉斯方程为  $\rho = 0$  的区域：

$$\nabla^2\varphi = 0$$

寻求泊松方程或拉普拉斯方程的解是一个积分过程，在所得的通解中必然出现一个未确定的常数，这说明只由拉普拉斯方程不能唯一确定静电场的解，还必须利用静电场的边界条件及电位的性质来确定通解中的常数。但是作为解决具体的静电场问题，需要根据实际的问题在场域上设置合理的边界条件，这就是所谓的静电场的边值。通过设置实际情况的边界条件就能得到唯一确定的静电场的解。在场域的边界面  $\Gamma$  上给定边界条件的方式有以下几种类型：

(1) 第一类边界条件

场域边界面  $\Gamma$  上各点的电位值为已知

$$\varphi(\mathbf{r})|_{\Gamma} = f_1(\mathbf{r}_b)$$

其中，相应边界点的位矢为  $\mathbf{r}_b$ ，场点的位矢为  $\mathbf{r} = \mathbf{e}_x x + \mathbf{e}_y y + \mathbf{e}_z z$ 。

(2) 第二类边界条件

场域边界面  $\Gamma$  上各点的法向导数为已知

$$\left. \frac{\partial \varphi(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}} \right|_{\Gamma} = f_2(\mathbf{r}_b)$$

其中，表示分界面的单位法向量为  $\mathbf{n}$ 。

### (3) 第三类边界条件

场域边界面  $\Gamma$  上各点电位和电位法向导数的线性组合的值为已知

$$\left[ \varphi(\mathbf{r}) + f_3(\mathbf{r}) \frac{\partial \varphi(\mathbf{r})}{\partial \mathbf{n}} \right]_{\Gamma} = f_4(\mathbf{r}_b)$$

所以，只要给出三类边界条件中的任意一个条件，电位函数就能得出一个唯一的确定的解。然而实际中边值问题往往定义的场域中电解质并不是完全均匀的，但能分成几个均匀的电介质子区域，按各电介质子区域分别写出拉普拉斯方程的或泊松方程的定解。作为定解条件，还必须相应的引入不同媒质分界面上的衔接条件，即：

$$\varphi^+ = \varphi^-$$

$$\left( \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^+ - \left( \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^- = \sigma$$

其中，两种媒质分界面上电荷面密度为  $\sigma$ ，单位是  $\text{C}/\text{m}^2$ ；两种不同媒质介电系数分别为  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ 。

## 2.2 电准静态场原理

绝缘子洁净条件下的电场可看作为纯电容性分布，建立其二维截面模型通过静电场法可计算得出其沿面电场分布。而对于覆有湿污的绝缘子，表面存在较大泄漏电流，泄漏电流对绝缘子电场的作用不可忽略，且染污绝缘子的电场分布呈阻容性，因此解决湿污条件下绝缘子电场分布问题不能单纯的依靠静电场和恒流场。此时应该选择电准静态场进行分析<sup>[43]</sup>。

时变电磁场中，当感应电场远小于库仑电场时，称为电准静态场。在计算许多工程问题的时候，由于时变电磁场的频率较低，在某些特定的情况下如电气设备、电力传输、生命科学等，可以不考虑二次源的作用，因此满足电准静态场的分析条件。

因此，由上述内容可知在电准静态场中可以计算沙尘地区湿污条件下绝缘子的电场分布情况。通过已有文献中提出用复数介电系数替换拉普拉斯方程或者泊松方程中的介电系数求解，也就是将拉普拉斯或者泊松方程中的  $\varepsilon$  替换为  $\rho + j\omega\varepsilon$ ，文献中的实测结果能很好的与仿真得出的污秽绝缘子电场分布结果相符。通过以上分析，在电准静态场域

中应用有限元法计算接触网腕臂棒形柱式复合绝缘子表面出现干燥带时电场分布情况的研究是可行的。研究目的为分析干燥带及其相关参数的变化对接触网复合绝缘子电场分布的影响，通过对干燥带和湿污层设置不同电阻率，且改变干燥带其它参数来进行仿真分析。

单相交流电压下接触网柱式复合绝缘子绝缘子，其电位分布满足泊松方程：

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

在自由电荷体密度  $\rho=0$  时，满足拉普拉斯方程：

$$\nabla^2\varphi = 0$$

由于绝缘子的模型属于轴对称模型，因此在整个求解域内：

$$\frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left\{ \gamma(\rho + j\omega\varepsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ (\rho + j\omega\varepsilon) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right\} = 0$$

在高压端和与低压端边界上：

$$\varphi|_{l_0} = f_0(\rho)$$

在绝缘子的对称轴上：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \gamma} = 0$$

在两种不同类型电介质接触的边界上：

$$\varphi_1 = \varphi_2, (\rho_1 + j\omega\varepsilon_1) \frac{\partial \varphi_1}{\partial \mathbf{n}} = (\rho_2 + j\omega\varepsilon_2) \frac{\partial \varphi_2}{\partial \mathbf{n}}$$

在人工截断边界上：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} + f_1(p) = f_2(p)$$

其中，两种不同类型电介质分界面上的电位分别为电位为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ，两种电介质介电系数分别为  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ ，交流电压的角频率  $\omega$ ，材料的电导率  $\rho$ 。

采用有限元法求解以得：

$$\begin{cases} F(\varphi) = \frac{1}{2} \int_V (\rho + j\omega\varepsilon)(\nabla\varphi)^2 dV + \frac{1}{2} \int_S (\rho + j\omega\varepsilon)(f_1\varphi - f_2\varphi) dS \\ \delta F(\varphi) = 0 \\ \varphi|_{I_0} = f_0(p) \\ \varphi|_{ab} = 0 \end{cases}$$

其中，场域为 $V$ ，包围的闭合曲面为 $S$ 。

### 2.3 有限元法原理

有限元方法是被高压绝缘领域广泛采用的一种数值求解方法。由于覆沙和表面出现干燥带的绝缘子仿真模型几何结构复杂，结构尺寸较小，材料属性较多，因此边界条件的处理十分复杂，其它计算方法不能很好的解决这类问题。有限元法能够合理的解决第二、三类边界条件的要求，不需要分开处理。有限元法的单元剖分密度可以满足工程对计算结果精度的要求<sup>[44]</sup>。

有限元法的基础是变分原理，它将一个大的区域离散成有限个小单元，这些单元互不重叠，在每个小单元内设置合适的插值点。每个小单元空间的多元函数极值问题就可以由变分问题转化而得。为有限元子空间中的多元函数极值问题，多元函数的极值可用一组多元代数方程组表示，多元代数方程的解即为边值问题的解。

沙尘环境下绝缘子的三维静电场边值问题为：

$$\begin{cases} \nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} & (x, y, z \in G) \\ \varphi = U_0(x, y, z) & (x, y, z \in \Gamma_1) \\ \frac{\partial\varphi}{\partial n} = 0 & (x, y, z \in \Gamma_2) \\ \left(\varepsilon_1 \frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)^- - \left(\varepsilon_2 \frac{\partial\varphi}{\partial n}\right)^+ = \sigma & (x, y, z \in \Gamma_{in}) \end{cases} \quad (2.6)$$

其中， $G$ 为所求整个三维模型的场域； $\Gamma_{in}$ 为不同种类媒质分面的边界； $\Gamma_1$ 为绝缘子高端与低压端两端金具上的边界； $\Gamma_2$ 为三维简化模型的对称截面边界。将式 2.6 转化为等价的泛函极值问题可得下式：

$$\begin{cases} I(\varphi) = \iiint_G \left\{ \frac{\varepsilon}{2} \left[ \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \right] - \rho f \right\} dx dy dz \\ \varphi|_{\Gamma_1} = U_0(x, y, z) \end{cases}$$

由变分问题转化得到的线性方程组如式 2.7:

$$\mathbf{K}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{P} \quad (2.7)$$

其中,  $\mathbf{P}$  为  $n$  阶载荷列向量;  $\mathbf{K}$  为经过强加边界条件处理后的  $n$  阶矩阵;  $\boldsymbol{\varphi}$  为  $n$  阶电位列向量。由式 2.7 求得各节点的电位值导入到公式 2.4 可求出电场强度。

## 2.4 COMSOL Multiphysics 有限元软件

应用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件对沙尘地区洁净、表面覆沙、表面出现干燥带三种条件下的接触网复合绝缘子的电场分布进行仿真计算。

### 2.4.1 软件介绍

COMSOL Multiphysics 基于第一性原理而构建, 以诸如物质运移、电磁场理论、结构力学等基础方程为理论基石; 精心设置了方便灵活的用户界面如图 2.1 所示, 用户可以在实用而简单的图形化界面中, 将这些基石任意组合, 满足自己的仿真需求。最终获得一个可信赖的仿真模型。COMSOL Multiphysics 可以根据模型的特点自动探测与模型相匹配的数学特征, 对于探测出来的方程矩阵, 软件可以根据所需求解精度自动选取合适的求解器进行求解。网格剖分算法可以根据模型结构和材料属性自动剖分。COMSOL Multiphysics 最突出的特点就是在高压绝缘领域的应用, 在国内外数值计算仿真中得到广泛的应用<sup>[45]</sup>。

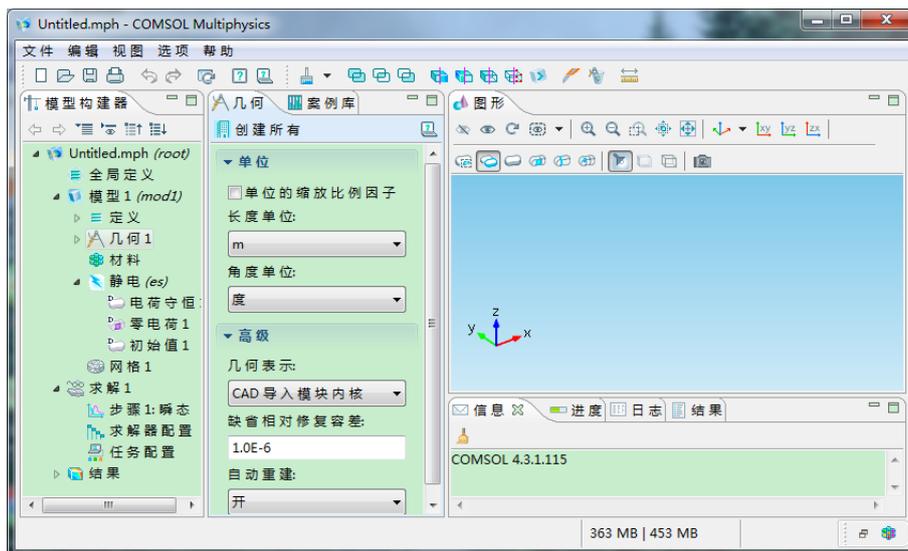


图 2.1 COMSOL Multiphysics 软件界面截图

## 2.4.2 仿真过程

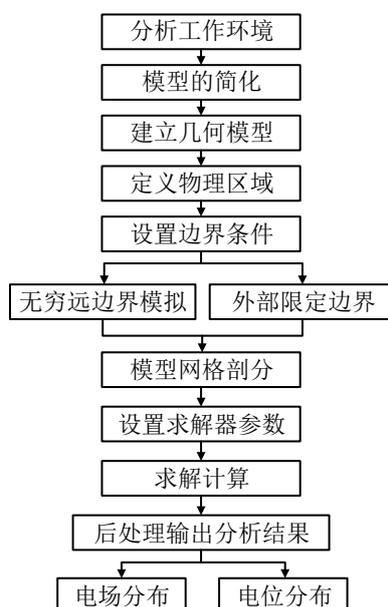


图 2.2 COMSOL Multiphysics 软件求解电位和电场过程图

### (1) 选择模型方程

根据所有研究的领域在软件选择合适的仿真模块，每个模块都有相应的基础方程作为基础，仿真内容为绝缘子电场分布，因此选择软件中的电场分析模块 AC/DC 模块。其次依据仿真对象的实际情况选择静电场和电准静态场两个场对洁净、覆沙及绝缘子表面出现干燥带三种情况的绝缘子进行仿真。

### (2) 创建和导入仿真模型

仿真模型可在 COMSOL Multiphysics 中直接建立，也可以选择用其它绘图软件绘制，如 CAD 和 Solidworks。使用其它绘图软件建立的模型，可以直接导入到软件中进行处理。文中的二维模型选择用 CAD 建立，三维模型较复杂因此选择 Solidworks 进行建立，相对于软件自身建立更快更方便。

### (3) 设定材料属性和边界条件

依据仿真对象的实际情况，在模型的不同部分分别设置相应物理参数，在模型中设置了接触网复合绝缘及空气的电介质参数，参数一定要合理准确。其次是边界条件的加载，根据绝缘子的工作电压，在绝缘子高压端和低压端分别加载相应的电压。

### (4) 生成网格

软件中网格的生成主要有两种方法，分别为手动剖分和自适应式剖分，可依据所研究对象的几何结构复杂度选择网格生成方式。由于沙粒尺寸很小，绝缘子几何结构复杂

因此选择手动网格，手动网格能根据实际模型选择最佳的网格尺寸，但需要较多的时间。

#### (5) 求解

用户可以根据自己的需要选择合适的求解器，根据仿真的规模可以选择不同的求解器，本文由于仿真对象规模比较大，所以选择准确性较高的迭代式求解器。

#### (6) 后处理、结果可视化、输出

通过求解计算可以得到仿真结果，其中包括网格剖分图、局部变量图、结果云图、等位图等，同时仿真求得数据可以输出保存，可以导入 MATLAB 等其它软件。绝缘子电位和电场分布的仿真过程如图 2.2 所示。

## 2.5 小结

根据分析对象的实际情况选择静电场和电准静态场两个场域作为仿真环境并阐述了两种场的基本原理；在场域选择的基础上采用有限元法进行计算并分析了有限元法的基本原理，建立了染污绝缘子电场计算的有限元求解的数学模型；阐明了所计算模型在 COMSOL Multiphysics 软件中的处理过程。

### 3 洁净接触网绝缘子电场分布

绝缘子的几何结构、生产材料、工作电压等因素都将决定其自身的电场和电位分布。为了能清晰的反映出沙粒和干燥带对绝缘子沿面电场带来的影响，首先仿真分析了洁净绝缘子电位和电场的分布情况。

#### 3.1 洁净绝缘子仿真模型的建立

##### 3.1.1 FQBG-25 型棒形柱式复合绝缘子

FQBG-25 型号棒形柱式复合绝缘子在接触网中大量使用。棒形柱式复合绝缘子较瓷棒形瓷绝缘子重量轻，抗污染能力强，降低了接触网绝缘事故的发生。棒形柱式复合绝缘子在接触网中主要是将带电体和其它非带电体进行电气隔离，使非带电体保持零电压，同时起到支撑和固定作用<sup>[13]</sup>。如图 3.1 所示，绝缘子的两端分别连接腕臂和支柱，两个柱式复合绝缘子其安装的角度不同，但是共同起到支撑悬挂的作用，始终保持承力索和接触线的悬挂高度稳定。

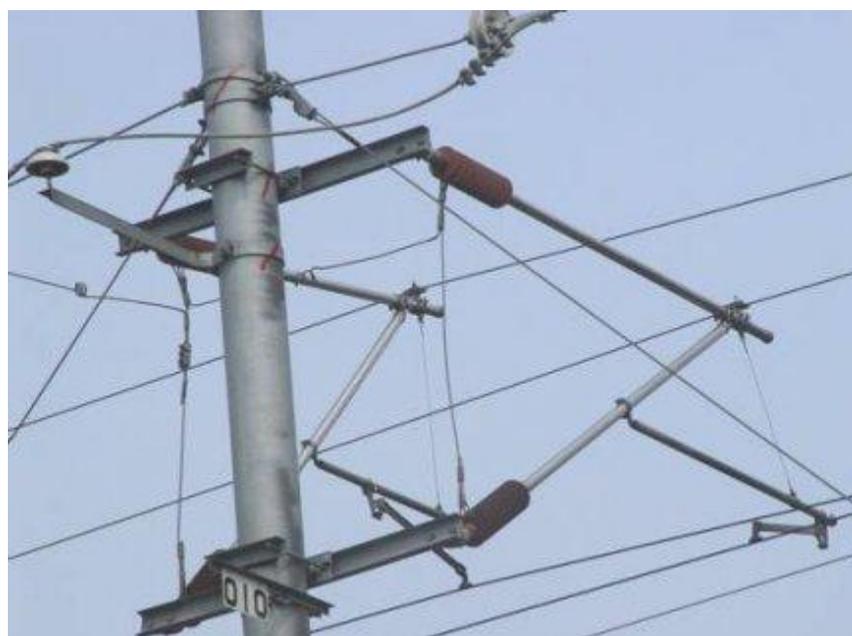


图 3.1 接触网腕臂棒形复合绝缘子现场图截图

仿真模型为接触网 FQBG-25/12 型单绝缘棒形柱式复合绝缘子<sup>[46]</sup>，其结构如图 3.2 所示，绝缘子结构高度 880mm，爬电距离 1600mm，大伞伞径 188mm，小伞伞径 158mm，芯棒直径 79mm，大、小伞裙个数分别为 7 个和 6 个。在此章节中为了便于说明，仍定

义从绝缘子低压端起起的第 1, 2, 3, ..., 13 个伞裙分别编号为 1, 2, 3, ..., 13 号伞裙。

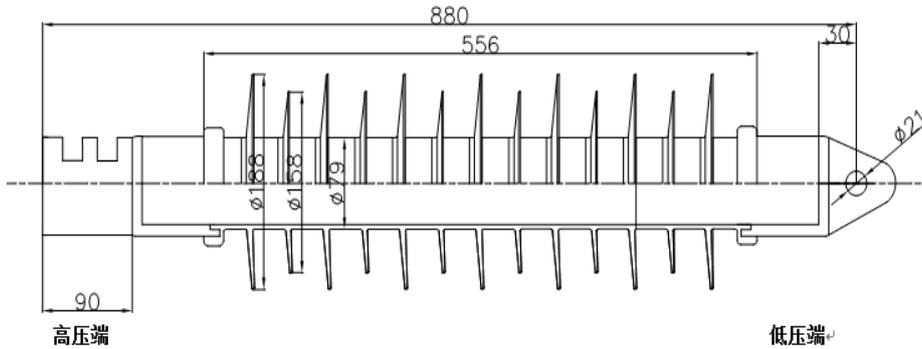


图 3.2 FQBG-25 型绝缘子结构截图



图 3.3 绝缘子三维简化图

根据绝缘子的实际尺寸，通过 Solidworks 建立了洁净绝缘子的三维模型如图 3.3 所示，将三维模型导入到 COMSOL Multiphysics 中的静电场。对仿真模型的各个材料的介电系数进行设置，空气为 1、金属为  $10^{10}$ 、硅橡胶为 3.5、芯棒为 7.2。仿真模型中绝缘子高压端金具上电压为  $41\text{kV}^{[47]}$ ，低压端金具电压为  $0\text{V}$ 。

### 3.1.2 人工截断法的应用

现实中接触网绝缘子处于无限的开区域中，而针对于有限元方法计算电场，计算区域应为有限区域，因此本文采用人工截断法将无限域转化为有限域<sup>[48,49]</sup>。针对于所建立的二维仿真模型，根据模型的轴对称性将有限的空气域设置成半圆。而针对所建立的三维仿真模型，截取的有限域设置成圆柱体如图 3.4 所示。有限域大小的选择将影响求解的准确性以及计算时间，因此应通过计算选择一个合适的有限域，仿真中通过增大所截

空气域的尺寸来制定合理的求解区域。

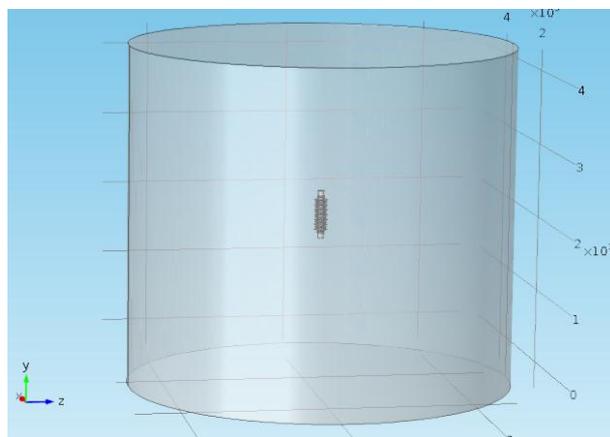


图 3.4 仿真模型软件截图

空气域的确定过程：以绝缘子的结构高度为基准，第一次将空气域设置为圆柱体的高和底面直径均为绝缘子结构高度的 2 倍，第二次将空气域设置为圆柱体的高和底面直径均为绝缘子结构高度的 5 倍，第三次将空气域设置为圆柱体的高和底面直径均为绝缘子结构高度的 5 倍。根据计算得出空气域的大小对绝缘子沿面最大场强(高压端 1600mm 处)的影响，选择合理的有限域。结果如表 3.1 所示，当空气域为 5 倍的高度与空气域为 8 倍的高度时，绝缘子沿面最大场强已经相同，考虑到节约计算时间，在此将空气域设置为 5 倍的绝缘子结构高度。

表 3.1 不同空气域尺寸下绝缘子沿面的最大场强

空气域尺寸	2 倍	5 倍	8 倍
最大电场强度(V/m)	$5.79 \times 10^5$	$6.89 \times 10^5$	$6.89 \times 10^5$

### 3.1.3 网格剖分

将仿真模型导入到软件中，根据模型不同材料的属性，设置好相应的材料属性参数后，应对其进行网格剖分。网格的大小应选择合理的尺寸，因为网格的尺寸影响着仿真的结果。同时针对不同的模型应该选择同一个合理的剖分尺寸，这样多次仿真的结果才有对比性。网格剖分时，对绝缘子的剖分选择网格尺寸较小些，剖分空气域的网格尺寸相对较大。这样可以在保证计算精度的前提下，提高计算效率，模型的网格剖分如图 3.5 所示。

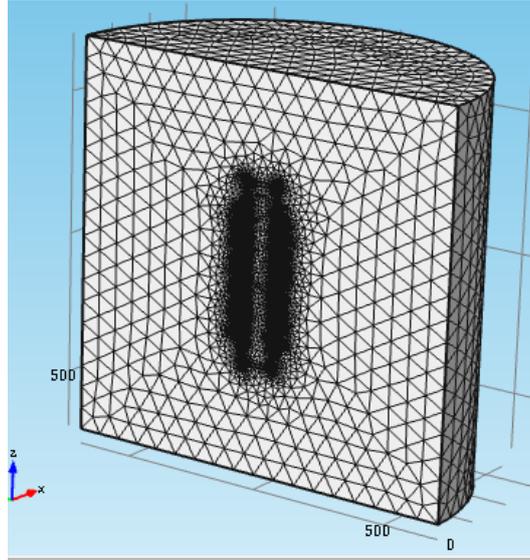


图 3.5 模型网格剖分截图

### 3.2 绝缘子电位分布

绝缘子的电位和电场在网格剖分后可以求解，绝缘子电位和电场的求解结果采用二维等位线图、云图和一维的曲线图表示。图 3.6 为绝缘子的等位线图，由图 3.6 可知，绝缘子高压端和低压端处电位梯度较大，因此等位线在其高压端和低压端区域密度较绝中间部位大。

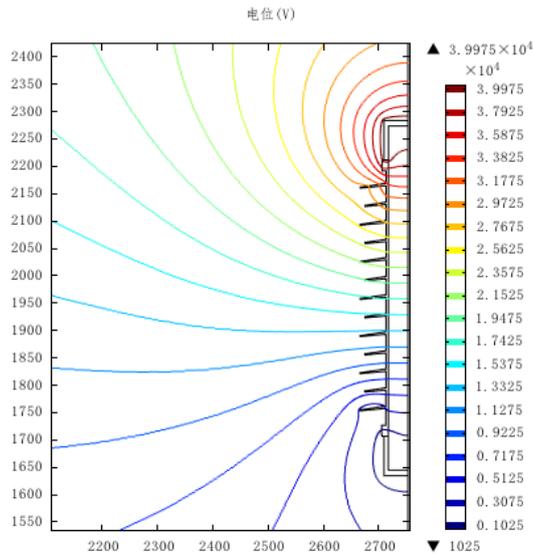


图 3.6 洁净绝缘子等位线截图

因为绝缘子工况下高压端加载高电压而低压端为零电位，致使电位大体趋势为从绝缘子高压端到低压端逐步降低，如图 3.7 所示。由图 3.7 可知，绝缘子局部的沿面电位并非呈单调上升或单调下降，这是因为绝缘子特有的表面曲折的几何形状导致的。绝缘子中各个伞裙并非承受相同的电压，1~13 号伞裙两端承受的电压分别占总工作电压的 8.67%、4.32%、3.47%、1.70%、1.23%、0.47%、0.71%、1.16%、2.15%、2.62%、4.57%、5.58%、10.19%。显然绝缘子 1 号、2 号、3 号、11 号、12 号、13 号伞裙两端承受的电压明显高于 4~10 号伞裙绝缘子两端承受的电压。电位梯度较高的位置出现在绝缘子高低压金具处，这致使靠近高低压金具处的伞裙承受较高的电压，绝缘子两端金具附近具有较高的电位梯度，因此导致靠近绝缘子高压端和低压端金具处的伞裙承担较高的电压，中间伞裙承担的电压相对较低。

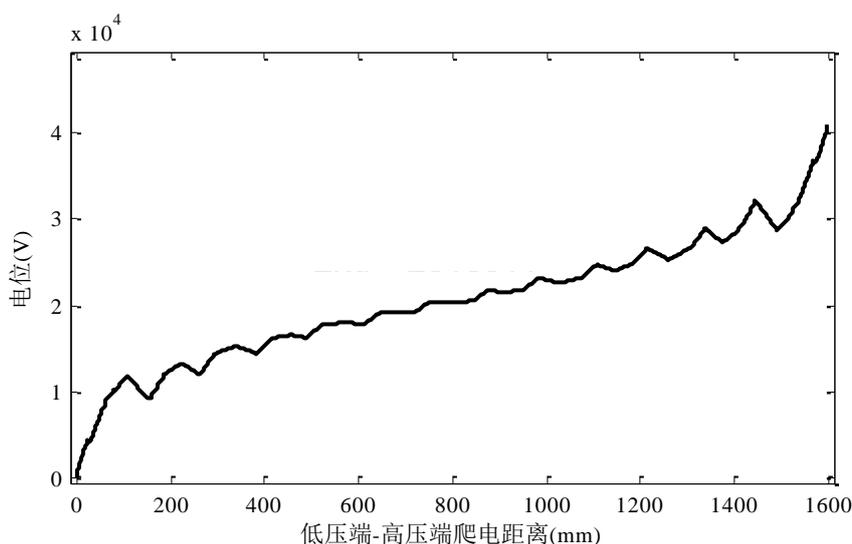


图 3.7 洁净绝缘子沿面电位分布

### 3.3 绝缘子电场分布

金具上存在分布的电荷导致较高电场强度的区域出现在金具较近。大多数的电场线是由绝缘子的高压端指向低压端，绝缘子的高压端金具和低压端金是电场线发出点与汇聚点，因此电场线较密集处为金具附近，同样也显示出金具附近电场强度相对其它位置高，图 3.8 为求解出的洁净绝缘子整体的电场分布云图。

绝缘子沿面电场分布可以通过更加清晰直观的电场分布曲线图表示，在此求解的电场强度均为模值。如图 3.9 所示，同样电场强度较高处为绝缘子高低压端附近而中间位置的场强相对较低，整个绝缘子沿面电场分布呈“U”形。绝缘子沿面电场近似成“U”型分

布，场强在高低压端金具与硅橡胶的联接处分别达到  $6.949 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $6.771 \times 10^5 \text{V/m}$ 。伞裙的上下表面与柱体交界处具有较高电场强度，伞裙边沿处电场强度相对较低。因此可得绝缘子高低压端金具与硅橡胶联接处，即空气、金具、硅橡胶三种介质的连接点处容易产生局部电弧。

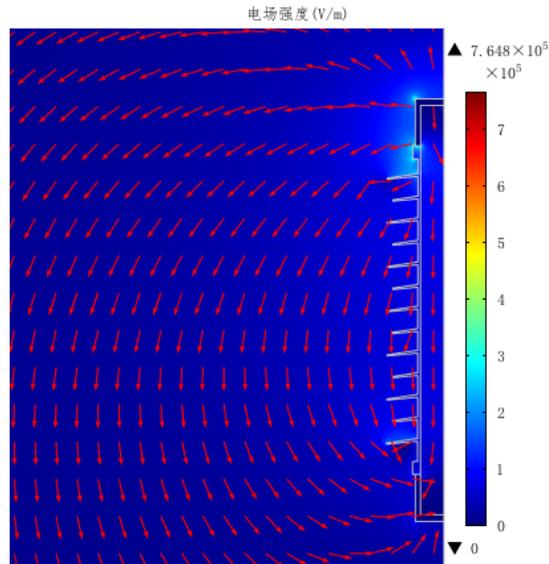


图 3.8 洁净绝缘子电场分布仿真截图

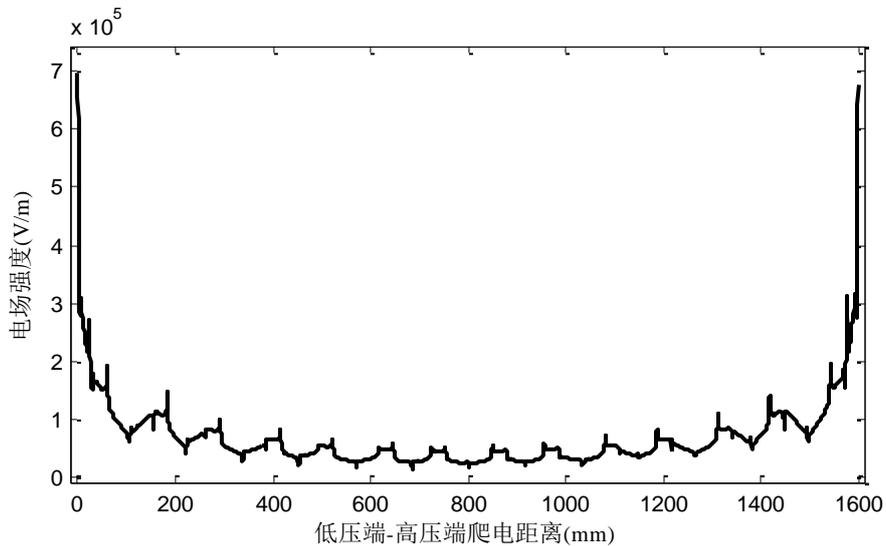


图 3.9 洁净绝缘子沿面电场分布

### 3.4 绝缘子伞裙电位和电场分布

绝缘子的每个伞裙所分布的电场和电位曲线变化趋势具有较强的相似性，电位和电

场变化趋势相似度较高的伞裙为 3~11 号伞裙。以 2~5 号伞裙为例，2~5 号伞裙的电位分布如图 3.10(a)~图 3.10(d)所示，其 2~5 号伞裙的电场分布如图 3.11(a)~图 3.11(d)所示。由图 3.6 可知，3~11 号伞裙处等位线间具有相似的距离，等位线分布较绝缘子高压端和低压端疏，各条等位线近似平行。因此导致了 3~11 号伞裙的电位曲线变化趋势近似相同。由图 3.9 可知，高压端和低压端处电场线均分布比较密集，而 3~11 号伞裙部分电场线分布相似，较绝缘子高低压端疏。因此高低压端附近场强的幅值明显高于绝缘子中部电场强度，中部场强幅值较低，场强变化趋势相似，中部每个伞裙的场强幅值近似相同。

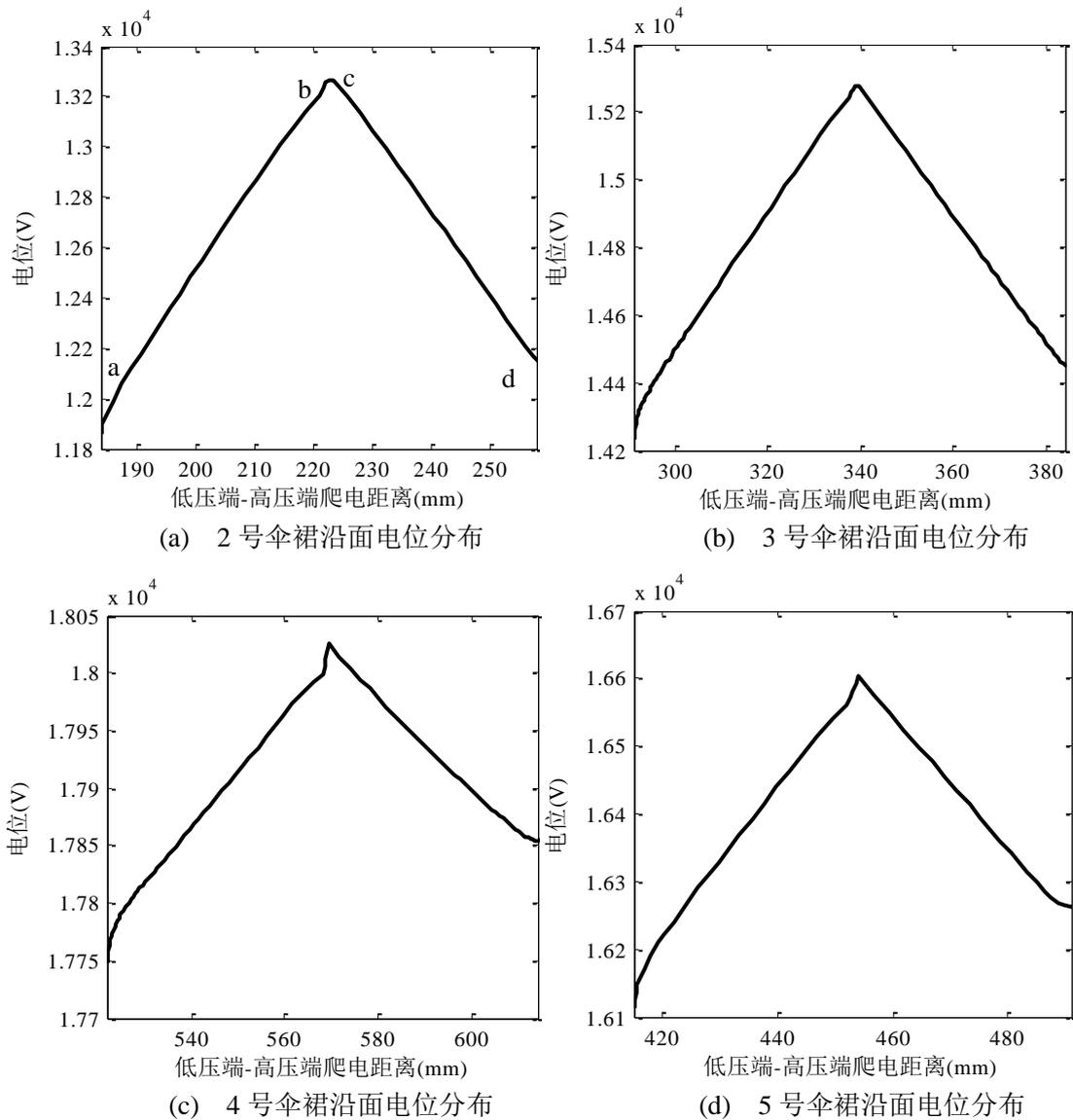


图 3.10 2~5 号伞裙沿面电位分布

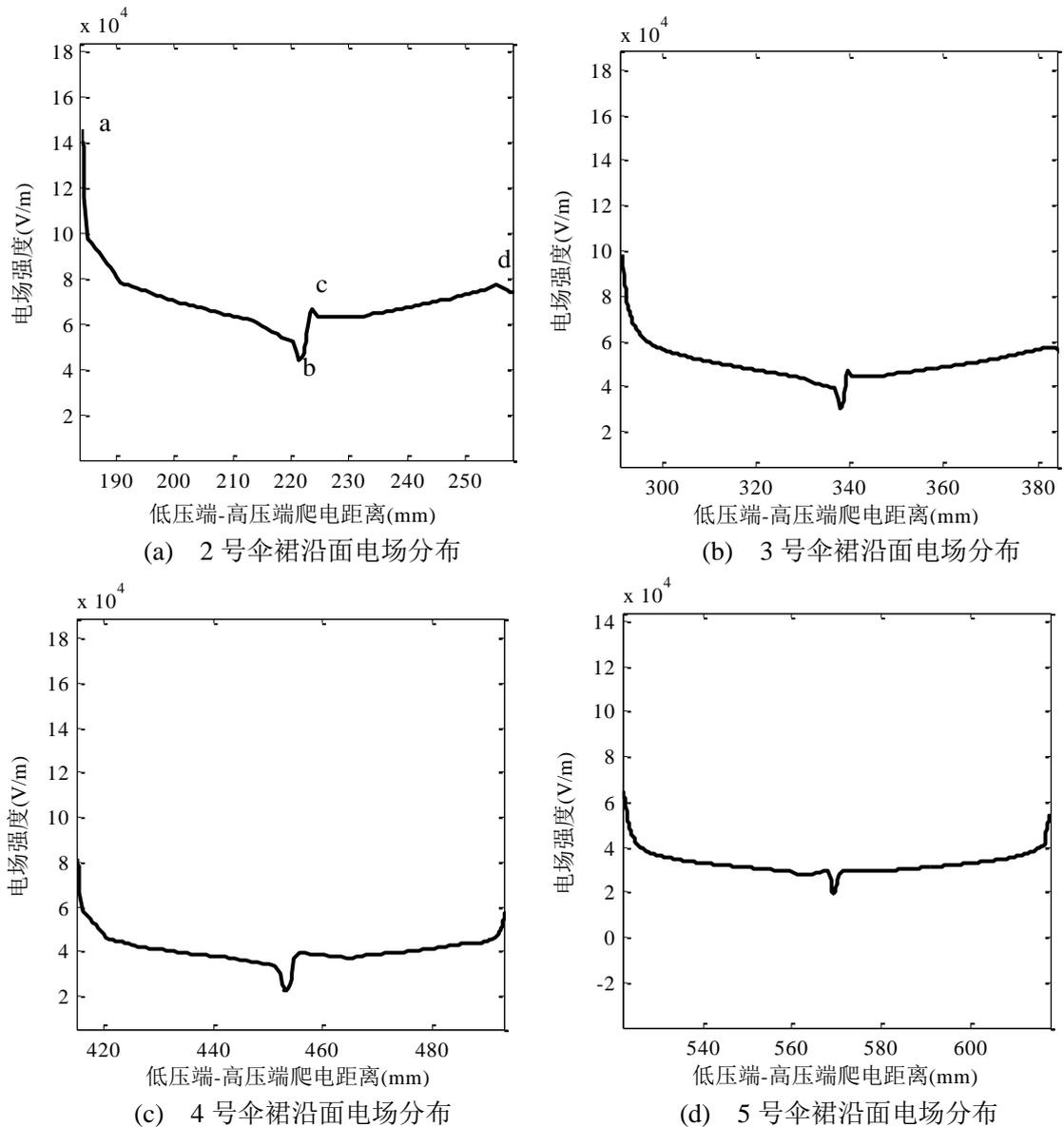


图 3.11 2~5 号伞裙沿面电场分布

图 3.12 中，以 2 号伞裙为例，a 表示绝缘子伞裙上表面与柱体交界处，b 表示伞裙上表面与伞裙边沿的交界点，c 为伞裙下表面与伞裙边沿的交界点。本文以 2 号、3 号、4 号、5 号伞裙为例，分析绝缘子单个伞裙沿面电位和电场的分布情况。如图 3.10 所示，2 号、3 号、4 号、5 号伞裙的电位分布趋势相似，这与绝缘子伞裙相似的几何尺寸及相似的伞裙形状有关，伞裙上下表面与柱体交界处电位较低，而伞裙边沿处电位较高。而由图 3.11 可知，4 个伞裙电场分布曲线也近似相同，但由于所处爬电距离的位置不同，其电场强度的幅值不同，伞裙上表面与柱体交界处电场强度较大，伞裙边沿电场强度相

对较小。因此对单个伞裙而言，伞裙上下表面与柱体处相对伞裙边沿更易成为电弧的发起点，进而产生局部电弧。

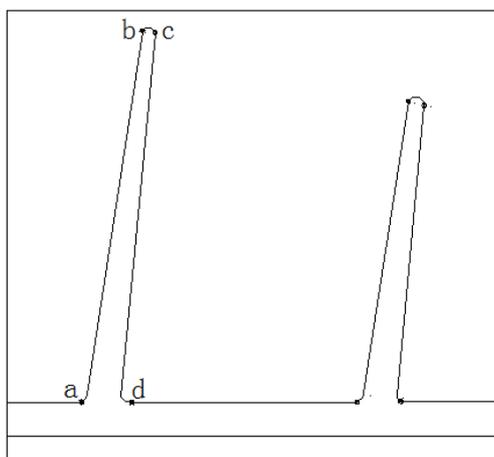


图 3.12 2 号伞裙表面位置点截图

### 3.5 计算方法的验证

现场测量是证明计算结果正确与否的最有效方法，但由于污秽情况复杂很难在实验室模拟仿真中进行绝缘子沿面电场和电位的测量。因此建立了洁净的 XP-70 瓷绝缘子的仿真模型，同样应用有限元法在软件中的静电场进行仿真分析。计算得出的绝缘子的电场分布情况与文献[50]中提出的实际测量数据相比较，结果表明：所得计算结果和实测结果近似相同，略有误差但在工程误差范围内，误差是由于实际测量中测量仪器和人为操作造成的。通过计算结果和实测结果的对比证明，本文对场域的选择、模型的建立，模型的仿真操作均是合理可行的。

### 3.6 小结

首先建立洁净 FQBG-25 型接触网复合绝缘子模型，通过人工截断法将无限域问题转化为有限域问题求解。其次选择合理的剖分方式和网格尺寸，计算出洁净绝缘子沿面电位和电场分布。结果表明：伞裙上电位和电场分布趋势相似度最高的为绝缘子中部的伞裙，整个绝缘子沿面电场分布类似“U”形。电位从低压伞裙到高压端伞裙逐渐增大。

## 4 表面覆沙时绝缘子沿面电场分布计算

绝缘子闪络的根本原因是其沿面电场畸变，而沙尘环境下覆着在绝缘子表面的中性沙粒和带电沙粒可能对绝缘子沿面电场的畸变起到重要作用。因此，分别从覆着在绝缘子表面沙粒的粒径大小、沙粒的带电量大小、沙粒的极性和覆着位置对绝缘子电场的影响进行分析。

### 4.1 覆沙绝缘子仿真模型的建立

为了与覆沙复合绝缘子沿面电场分布进行比较，由第三章可知绝缘子每个伞裙沿面电位和电场分布具有相似性，洁净复合绝缘子的沿面电位分布，从低压端到高压端电位逐渐增大，显然绝缘子 1 号、2 号、12 号、13 号伞裙两端承受的电压明显高于 3~11 号伞裙绝缘子两端承受的电压，其四个伞裙沿面电场分布也较其它伞裙高。因此研究沙粒对绝缘子沿面电场的影响，选择 1 号、2 号、12 号、13 号伞裙作为研究对象。

表 4.1 电介质参数

物理介质	相对介电系数
空气	1
沙粒	3.5
金属	$10^{10}$
硅橡胶	3.5
芯棒	7.2

为了兼顾仿真效率和精度，本文对实际模型进行了如下简化：实际线路中由于导线、杆塔等影响，绝缘子电场分布不是对称场，但由于沙粒体积相对绝缘子甚小，且本文着重研究覆着在绝缘子上沙粒的性质对绝缘子电场分布的影响，因此，可忽略杆塔和导线的影响，将绝缘子模型视为轴对称结构<sup>[39]</sup>。由于绝缘子两端的金具体积与圆柱体相似，所以将金具简化为圆柱体。绝缘子周围空气域是无界域，而有限元法只能求解有界场域问题，因此，本文采用人工截断边界法将无界域问题转化为有界域问题。将绝缘子周围空气域设置成与绝缘子同轴的圆柱体，并在圆柱体表面上加载零电位，同时用不同直径的小球体来模拟不同粒径的沙粒。由于完整的三维模型的复杂程度，计算时需要的内存和计算量普通计算机无法满足。因此根据模型的轴对称性，本文通过对 $180^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $30^\circ$ 以及 $3^\circ$ 的模型进行电场分布计算，其五种情况的场强分布近似相同，因此本文选取过圆柱体中心轴 $3^\circ$ 圆心角的扇形柱体作为仿真模型，如图 4.1 所示。模型中各电介质参

数如表 4.1 所示。

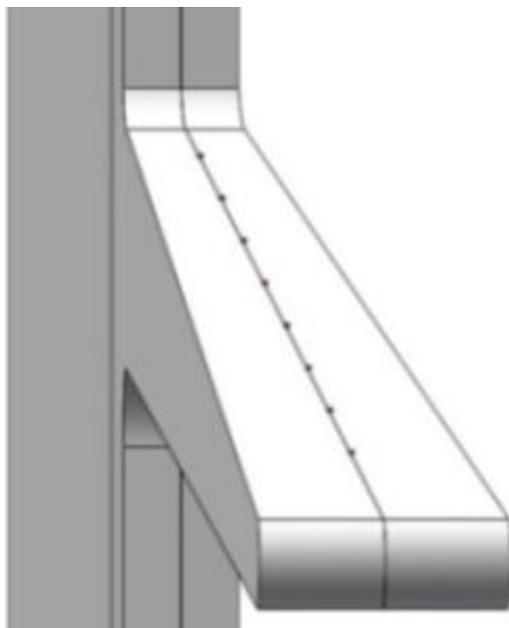


图 4.1 覆沙绝缘子模型局部放大图截图

## 4.2 沙粒粒径对绝缘子沿面电场分布的影响

根据屈建军等人选取的西北地区粒径为 0.1mm~0.6mm 的沙粒进行的沙尘暴起电模拟风洞实验研究<sup>[4]</sup>，本文用粒径分别为 0.1mm、0.3mm、0.6mm 规则小球体模拟沙粒进行仿真，由上述仿真可知，绝缘子 13 号伞裙两端承受了最大电压，所以仿真中将 8 个粒径相同的沙粒覆着在高压端第 1 个大伞裙(即 13 号伞裙)的上表面。

为了便于说明将 8 个沙粒分别编号为 1~8。图 4.2 为选取第 4 号沙粒分别为不同粒径时，沙粒处绝缘子沿面的电场强度。由于沙粒的介电系数比空气介电系数大，因此沙粒会畸变绝缘子原有电场，同时绝缘子表面沙粒增加了绝缘子表面的粗糙度，在一定程度上也增强了绝缘子表面电场。

从图 4.2 中可以看出，爬电距离在 175.8mm 处为沙粒与绝缘子的交界点，此处洁净绝缘子电场强度为  $9.315 \times 10^4 \text{V/m}$ ，当粒径为 0.1mm、0.3mm、0.6mm 时，电场强度分别为  $9.72 \times 10^4 \text{V/m}$ 、 $1.028 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $1.048 \times 10^5 \text{V/m}$ 。图 4.3 为 8 个沙粒粒径分别为 0.1mm、0.3mm、0.6mm 时，绝缘子电场强度畸变情况。由图 4.3 可知，沙粒处绝缘子电场强度发生一定的畸变，沙粒处绝缘子的电场强度畸变程度与沙粒粒径大小有关，随着沙粒粒径的增大场强升高。

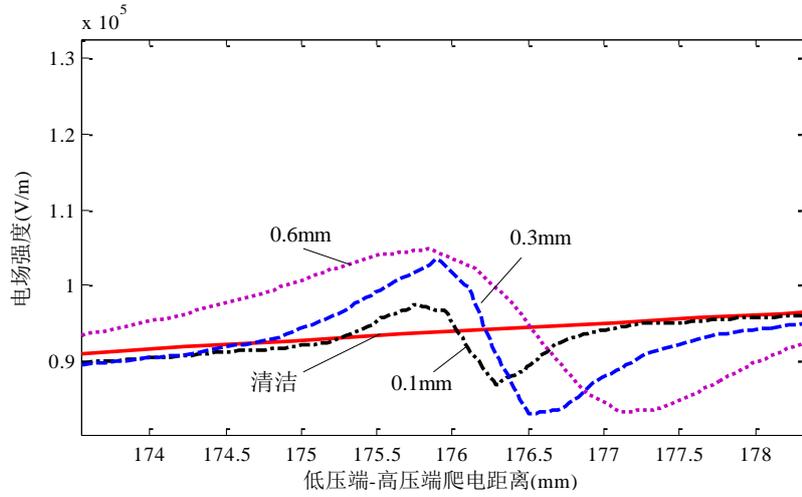


图 4.2 第 4 号沙粒处绝缘子沿面电场分布

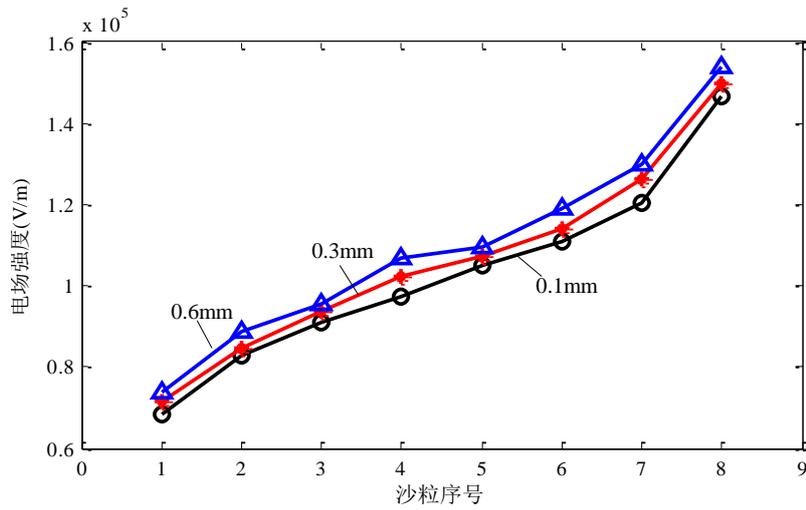


图 4.3 绝缘子沿面电场强度与沙粒粒径的关系

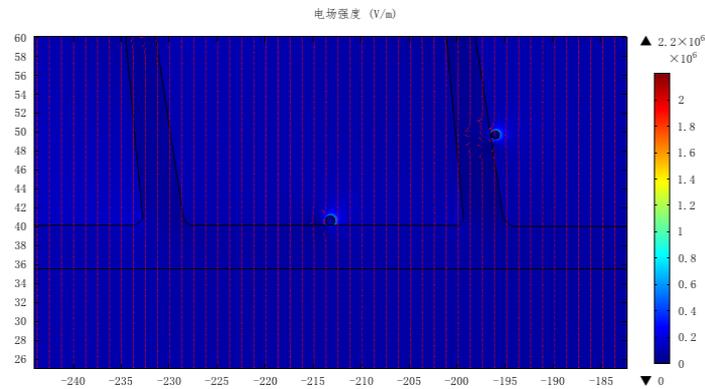
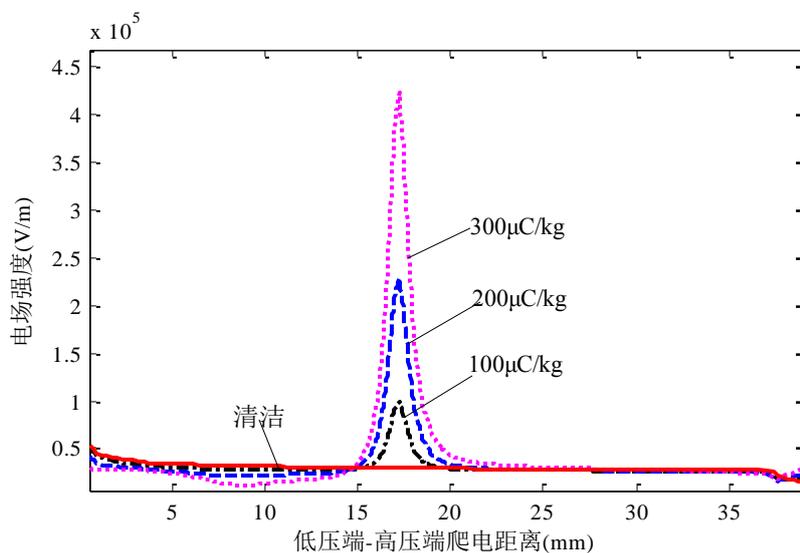
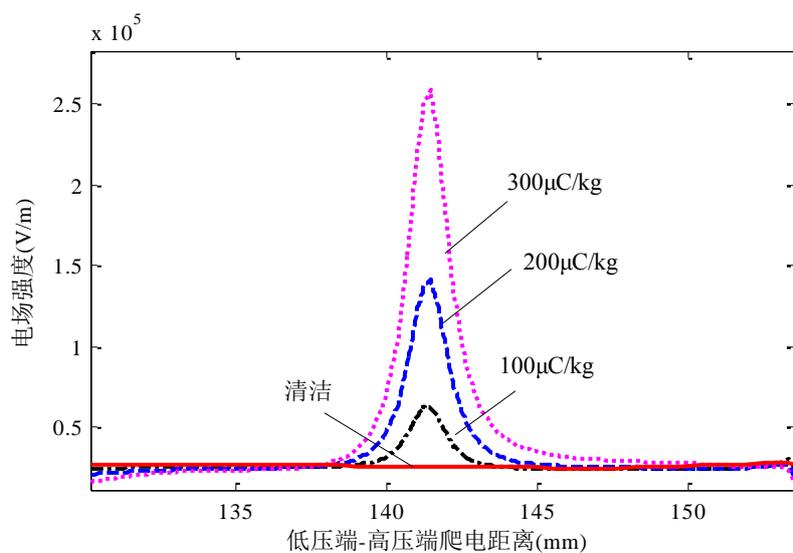


图 4.4 带电沙粒处绝缘子电场分布云图截图

### 4.3 沙粒带电量对绝缘子沿面电场分布的影响



(a) 7号伞裙下表面

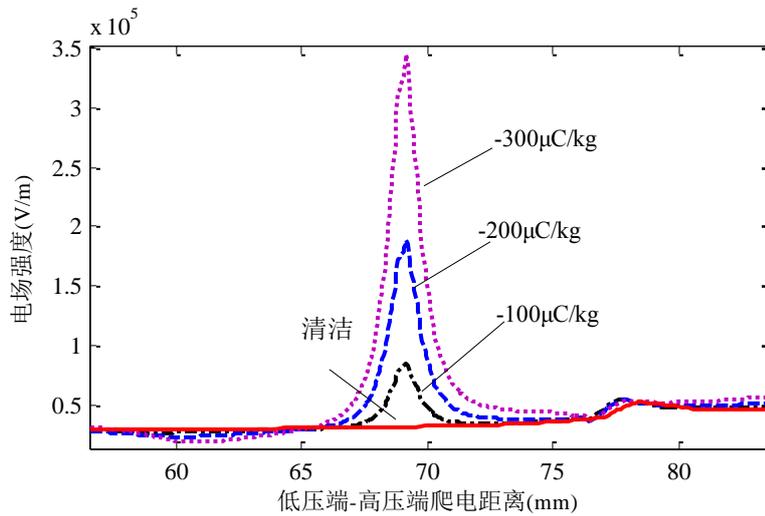


(b) 8号伞裙下表面

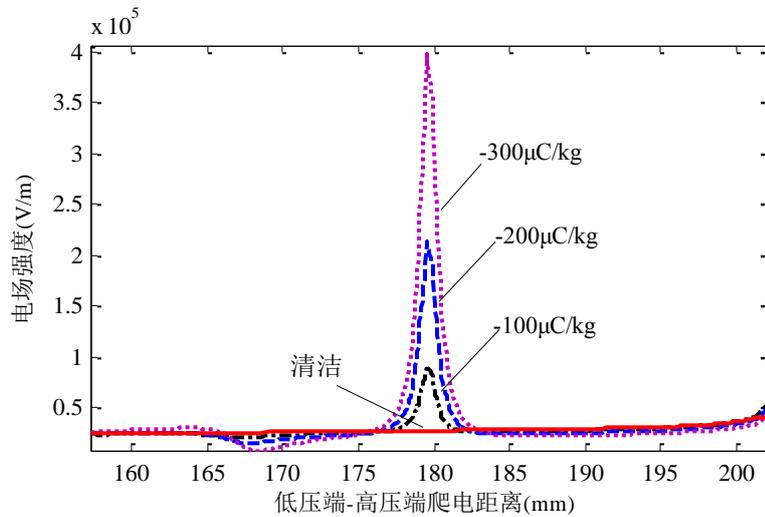
图 4.5 不同正电荷量的沙粒对绝缘子沿面电场的影响

图 4.4 可知, 电场线穿越带电沙粒时产生了一定的偏移, 沙粒处电场强度发生畸变。由图 4.5(a)所示, 7 号伞裙下表面沙粒带正电量为  $100\mu\text{C}/\text{kg}$  时, 沙粒处绝缘子表面电场强度为  $9.856 \times 10^4 \text{V}/\text{m}$ , 较洁净绝缘子电场强度增加了  $6.91 \times 10^4 \text{V}/\text{m}$ 。沙粒电荷量为  $200\mu\text{C}/\text{kg}$ 、 $300\mu\text{C}/\text{kg}$  时, 电场强度增加  $1.922 \times 10^5 \text{V}/\text{m}$ 、 $3.922 \times 10^5 \text{V}/\text{m}$ 。如图 4.5(b)所

示，8号伞裙上表面电场强度变化趋势与7号伞裙上表面相似。因此电场强度随着正电荷沙粒荷质比的增大而增大，当沙粒带电量达到一定值时，接触网复合绝缘子电晕放电将会产生，进而发生闪络。



(a) 7号伞裙上表面



(b) 8号伞裙上表面

图 4.6 不同负电荷量的沙粒对绝缘子沿面电场的影响

由图 4.6(a)可知，7号伞裙上表面覆着负电荷量的沙粒处，绝缘子表面电场明显升高。当8号伞裙上表面沙粒荷质比为 $-100\mu\text{C}/\text{kg}$ 、 $-200\mu\text{C}/\text{kg}$ 、 $-300\mu\text{C}/\text{kg}$ 时，电场强度较洁净状态下分别增加  $6.417 \times 10^5 \text{V}/\text{m}$ 、 $1.818 \times 10^5 \text{V}/\text{m}$ 、 $3.76 \times 10^5 \text{V}/\text{m}$ ，如图 4.6(b)所示。因此绝缘子表面覆有负电荷沙粒时，沙粒处绝缘子电场强度并非减小，而是随着沙粒荷

质比绝对值的增大而增大。因此从仿真结果可以得出沙粒负电荷量时，相同电压作用下，绝缘子表面空气介质承受的电场会增大，沙粒处局部电弧容易产生。由于吸附电荷的沙粒会降低绝缘子沿面空气的起弧电压，因此在沙尘地区绝缘子表面覆着带电沙粒时绝缘子发生沿面闪络的作用电压会降低，增加了绝缘子闪络的可能性。

#### 4.4 沙粒的极性和位置对绝缘子沿面电场分布的影响

为了探究沙粒极性和覆着位置对绝缘子电场的影响，本文选取了电场强度相对较高的两组伞裙为研究对象，即靠近低压端金具的 1 号和 2 号伞裙，靠近高压端金具的 12 号和 13 号伞裙。仿真中分别将粒径为 0.3mm 的沙粒分别覆着在 4 个伞裙的上下表面，沙粒的荷质比分别设为  $\pm 100\mu\text{C}/\text{kg}$  和  $\pm 300\mu\text{C}/\text{kg}$ 。

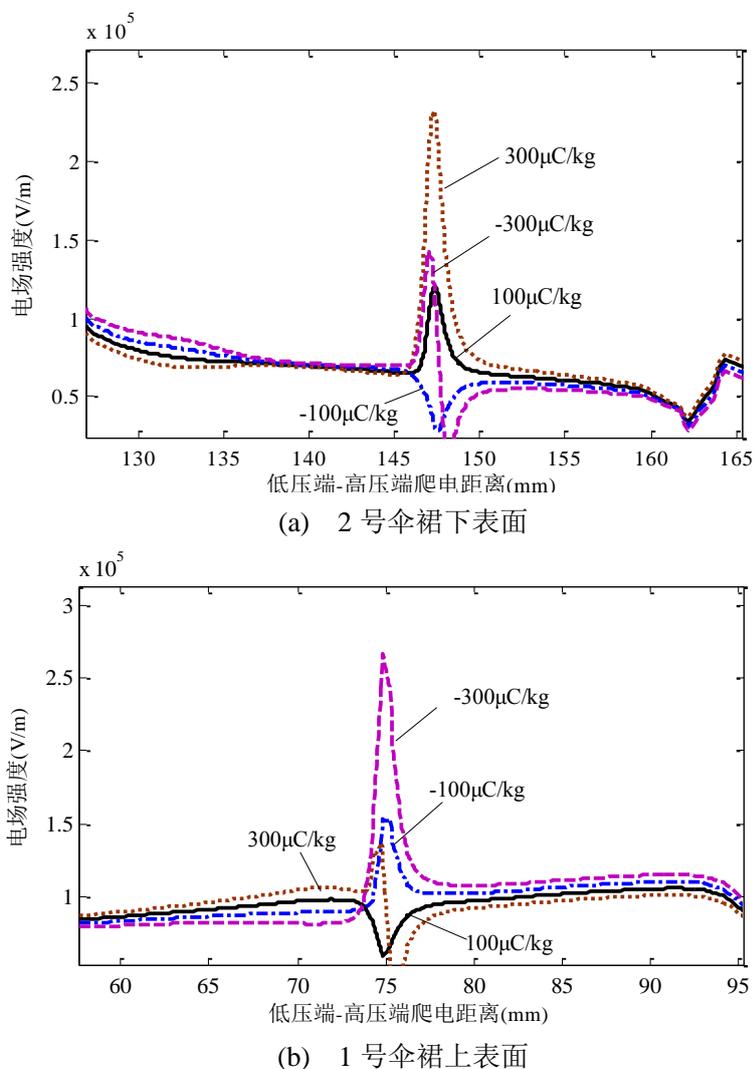
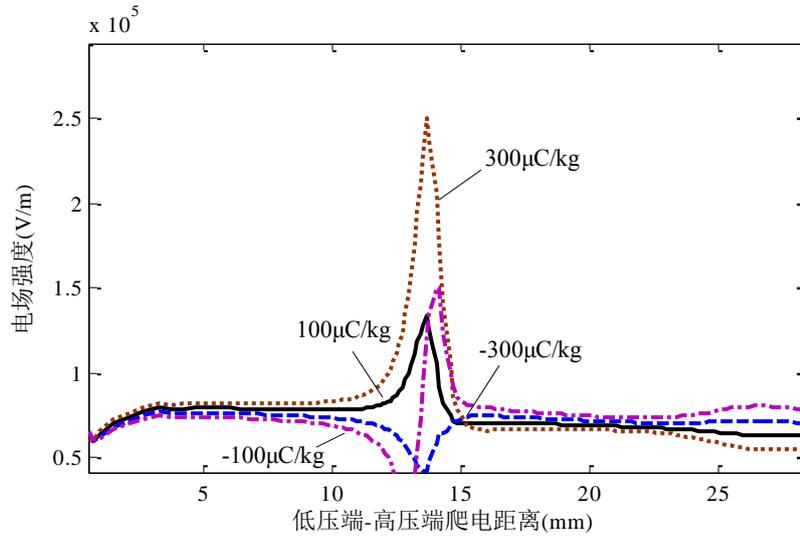
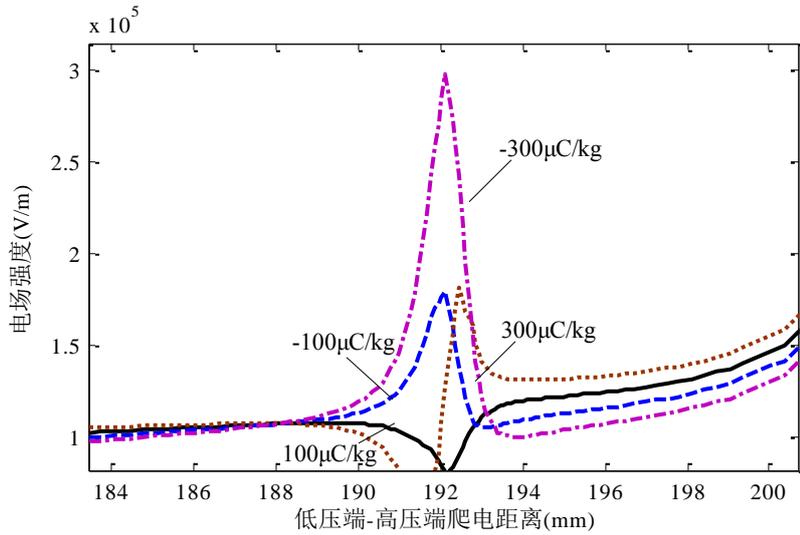


图 4.7 沙粒的极性和位置对绝缘子沿面电场影响



(c) 12号伞裙下表面



(d) 13号伞裙上表面

图 4.7 沙粒的极性和位置对绝缘子沿面电场影响

图 4.7 分别为 1 号和 13 号伞裙的上表面、2 号和 12 号伞裙的下表面覆着相同粒径、相同电荷量、不同极性的沙粒时，绝缘子沿面电场分布。从图 4.7 可知，当相同电荷量不同极性的沙粒覆着在绝缘子伞裙的同一位置时，由于沙粒的极性不同，带电沙粒产生的电场大小和方向均不同，因此绝缘子原电场叠加后，绝缘子表面电场畸变的程度也不同。由图 4.7(a)和 4.7(b)可知，伞裙上表面覆着负电荷量沙粒时，绝缘子电场增加幅度高于正电荷量沙粒的作用。相反，由图 4.7(c)和图 4.7(d)可得，当绝缘子下表面覆着沙粒时正电荷沙粒使绝缘子电场的增加幅度高于负电荷沙粒的影响。表 4.2 和表 4.3 统计了当高压端电压为 41kV 时，相同粒径、相同带电量、不同极性的沙粒在 4 个伞裙上、下表

面时，沙粒与绝缘子交界点的场强值。当高压端为负的 41kV 电压时，表 4.4 和表 4.5 统计了电场畸变情况。从表中数据可以得出，绝缘子高压端分别为正负 41kV 的电压下，沙粒极性和覆着位置均对绝缘子电场强度影响明显，且仿真结果均为沙尘环境中伞裙上表面易因负电荷量沙粒的影响而导致绝缘子闪络，而伞裙下表面电场受正电荷量沙粒影响大于负电荷沙粒的作用。

表 4.2 高压端为正电压 1 号伞裙和 2 号伞裙沙粒处的电场强度(V/m)

位置	1 号伞上表面	1 号伞下表面	2 号伞上表面	2 号伞下表面
100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	59240	152700	137100	266300
-100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	119700	70080	176500	132700
300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	41640	126900	94740	222100
-300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	120000	28780	230400	141600

表 4.3 高压端为正电压 12 号伞裙和 13 号伞裙沙粒处的电场强度(V/m)

位置	12 号伞上表面	12 号伞下表面	13 号伞上表面	13 号伞下表面
100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	35760	137800	160600	244300
-100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	134200	42250	249700	150200
300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	82260	179600	182100	297800
-300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	152900	49400	255500	179300

表 4.4 高压端为负电压 1 号伞裙和 2 号伞裙沙粒处的电场强度(V/m)

位置	1 号伞上表面	1 号伞下表面	2 号伞上表面	2 号伞下表面
100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	63380	154800	310400	449000
-100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	122600	70590	262700	165900
300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	37530	124800	246100	362900
-300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	126200	33080	408900	300200

表 4.5 高压端为负电压 12 号伞裙和 13 号伞裙沙粒处的电场强度(V/m)

位置	12 号伞上表面	12 号伞下表面	13 号伞上表面	13 号伞下表面
100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	41010	118300	325400	408200
-100 $\mu\text{C}/\text{kg}$	142300	46620	437900	309000
300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	175300	175300	356800	473900
-300 $\mu\text{C}/\text{kg}$	71760	71760	441600	336600

#### 4.5 小结

绝缘子表面覆着带电沙粒时，沙粒处绝缘子电场发生畸变。沙粒的粒径、沙粒的带电量、沙粒的极性和覆着位置均对电场分布有影响。接触网复合绝缘子表面覆有不同粒径的沙粒时，对绝缘子电场强度畸变程度不同。随沙粒粒径的增大，沙粒处绝缘子电场强度也小幅增大。带电沙粒对绝缘子沿面电场分布有较大的影响，电场强度随着沙粒带正负电荷量绝对值的增大而增大。绝缘子沿面电场分布受沙粒极性和覆着位置的影响明显。伞裙上表面，负电荷量沙粒对电场畸变程度高于正电荷量沙粒；相反，伞裙下表面，正电荷量沙粒对电场的畸变程度高于负电荷量沙粒。

## 5 表面出现干燥带时绝缘子沿面电场分布计算

沙尘地区沙尘量较大，这导致沉积在绝缘子表面的沙尘大大增加。当接触网绝缘子遇到较大的湿度天气时，沉积在绝缘子表面沙层得到湿润，绝缘子表面一旦湿润，大大减小了绝缘子表面的电阻率，同时绝缘子表面泄漏电流大幅升高。泄漏电流对污秽层有加热，烘干的作用，因此在污秽层电阻大的区域首先形成干燥带，同时在污秽层电阻相同的区域，泄漏电流较大的区域也容易形成干燥带。目前的研究对象主要是电力系统绝缘子且绝缘子类型为瓷绝缘子，而本文是针对工作环境特殊的接触网棒形柱式复合进行分析绝缘子表面的干燥带对绝缘子沿面电场的影响。本文首先分析绝缘子表面最容易形成干燥带的区域，其次计算了干燥带的宽度，干燥带的数目对绝缘子电场分布的影响情况。

### 5.1 表面出现干燥带绝缘子仿真模型的建立

本文研究绝缘子表面出现干燥带最严重的情况，干燥带规则均匀绕径向一周<sup>[38]</sup>，同时由于接触网绝缘子较电力系统绝缘子安装高度低，易受到列车经过时路面扬起的沙尘等因素的污染，文献[38]中设置污层厚度为 0.15mm，因此本文将污层厚度设为 0.2mm 且均匀的沉积在绝缘子表面。同时从工程近似的角度对模型进行了简化处理，将高压端、低压端用规则的圆柱体代替，忽略杆塔和导线对电场分布的影响，将整个模型视为轴对称<sup>[13-15]</sup>。应用基于有限元法的软件 COMSOL Multiphysics 建立基于轴截面一半的二维有限元模型，这在不影响计算结果的前提下大大减少了计算量和计算时间。图 5.1 和图 5.2 分别伞裙上干燥带为 5mm 和 10mm 模型，图 5.3 和 5.4 分别为伞裙表面出现两条和四条干燥带模型。但由于有限元法只能解决有限域问题，因此本文采用人工截断法截取绝缘子周围空气为一定半径长度的圆域。通过第三章计算得出当空气域半径取 5 倍绝缘子结构高度时，绝缘子沿面最大电场已经稳定，因此空气域半径取为 5 倍的结构高度如图 5.5 所示，具体电介质参数如表 5.1 所示。

表 5.1 电介质材料参数

材料	相对介电常数	电导率(S/m)
空气	1	$10^{-50}$
硅橡胶	3.5	$10^{-12}$
金具	$10^{10}$	$10^{10}$
湿污	20	1.025
干燥带	2.8	$10^{-10}$

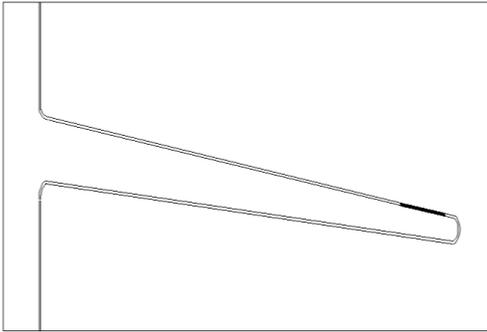


图 5.1 干燥带宽度为 5mm

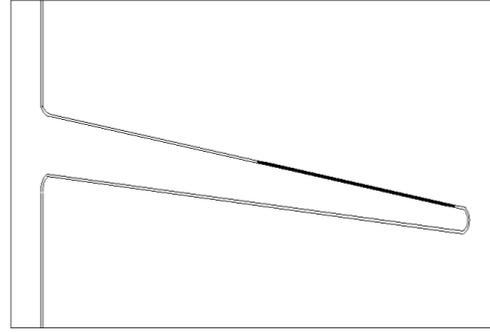


图 5.2 干燥带宽度为 20mm

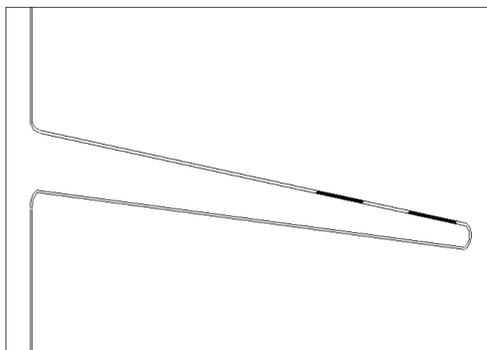


图 5.3 伞裙上两条干燥带

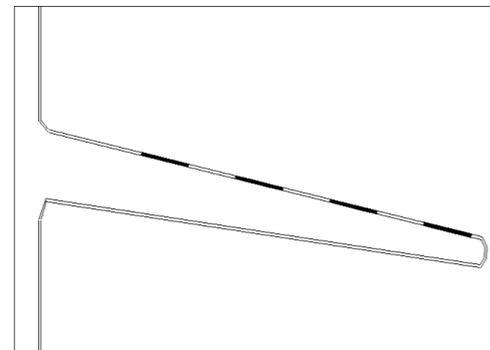


图 5.4 伞裙上四条干燥带

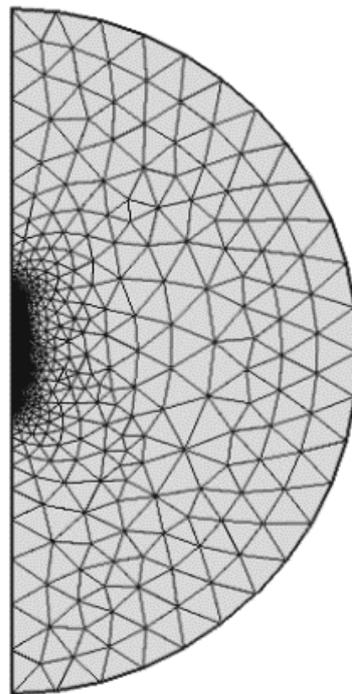


图 5.5 整体模型网格剖分截图

## 5.2 干燥带最容易出现区域的分析

通过有限元计算，在第三章得到洁净状态下绝缘子沿面电场分布。绝缘子沿面电场强度整体呈“U”形分布，高压端和低压端附近电场强度相对较大。每个伞裙上场强分布情况相似，高压端处第一个伞裙(13号伞裙)和低压端处第一个伞裙(1号伞裙)较其它伞裙场强增大，因此在后续的研究中，选取了13号伞裙作为分析对象来说明干燥带对其伞裙上电场强度的影响。

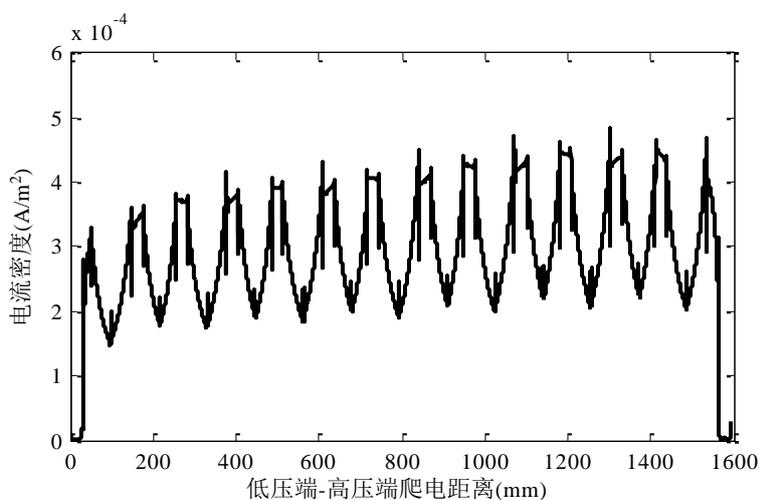


图 5.6 污层中电流密度

由于干燥带主要是由湿污层中绝缘子表面泄漏电流发热生成，因此分析绝缘子表面湿污层中电流密度的大小可得出不同位置处形成干燥带的难易程度。本文通过在整个绝缘子表面沉积 0.2mm 均匀厚度的湿污层来分析工作电压下，绝缘子沿面污层中各个位置的电流密度情况如图 5.6 所示。

由图 5.6 可知，绝缘子不同位置泄漏电流不同，但绝缘子每个伞裙及伞裙间柱体上泄漏电流有一定的相似性。伞裙间柱体表面泄漏电流较伞裙上下表面较高，且泄漏电流最低处为每个伞裙的边沿，因此绝缘子最容易出现干燥带的位置为伞裙间的柱体处，其次为伞裙的上、下表面和伞裙边沿。

## 5.3 干燥带宽度对绝缘子沿面电场分布影响

绝缘子表面出现干燥带时，干燥带改变了绝缘子工作环境，干燥带处电场强度发生明显畸变如图 5.7 所示，随着泄漏电流加热的作用干燥带逐渐变宽，绝缘子伞裙上、下表面以及伞裙间的柱体上有不同宽度的干燥带时沿面电场分别如图 5.8、5.9、5.10 所示。

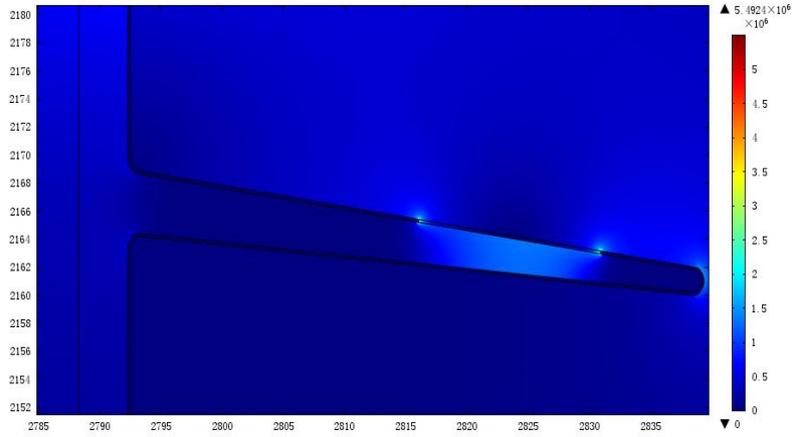
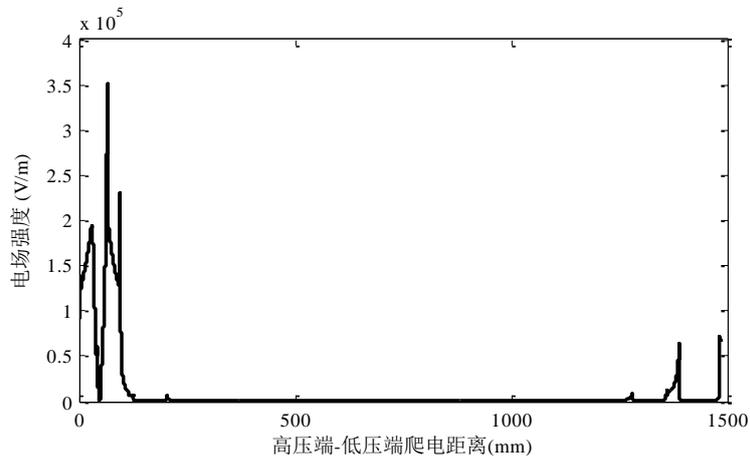
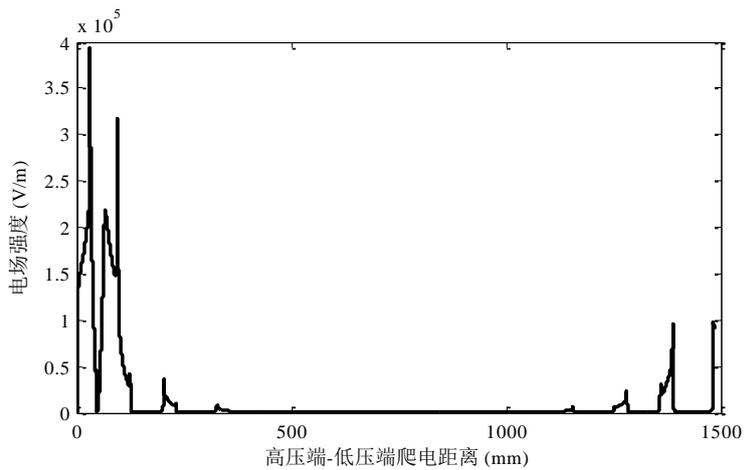


图 5.7 干燥带处绝缘子电场分布局部图截图

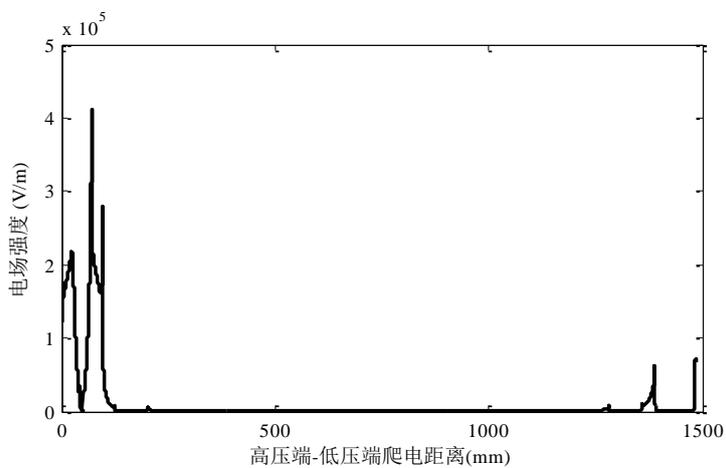


(a) 伞裙上表面 10mm 干燥带



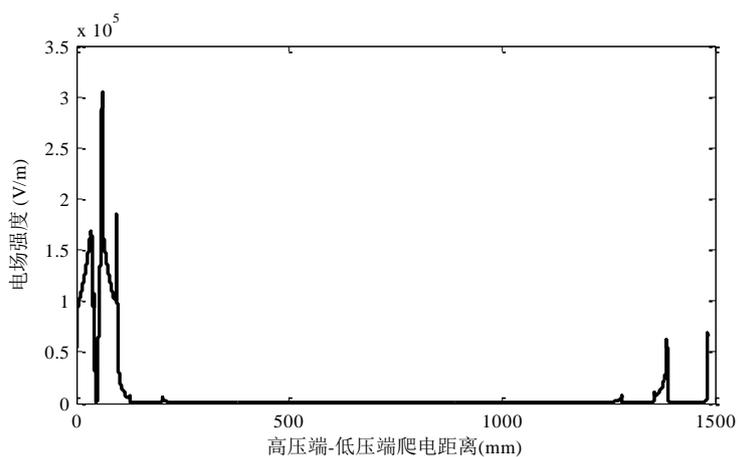
(b) 伞裙上表面 15mm 干燥带

图 5.8 伞裙上表面干燥带宽度对绝缘子沿面电场的影响

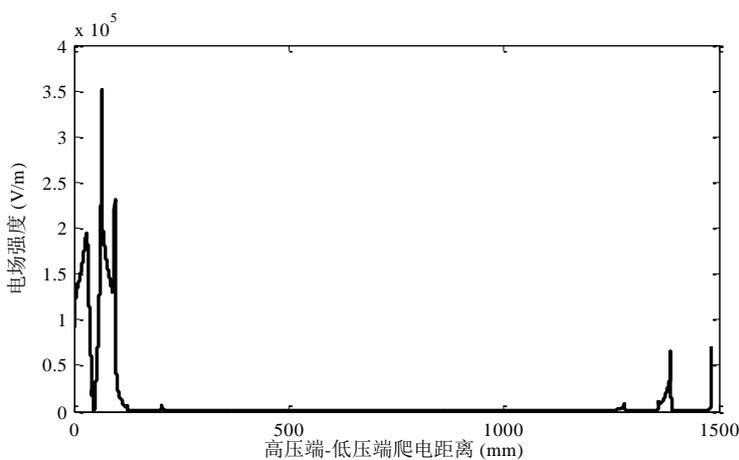


(c) 伞裙上表面 20mm 干燥带

图 5.8 伞裙上表面干燥带宽度对绝缘子沿面电场的影响

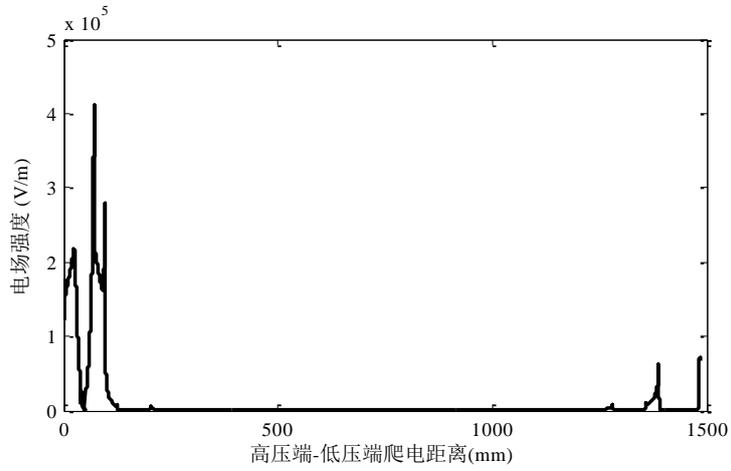


(a) 伞裙下表面 10mm 干燥带



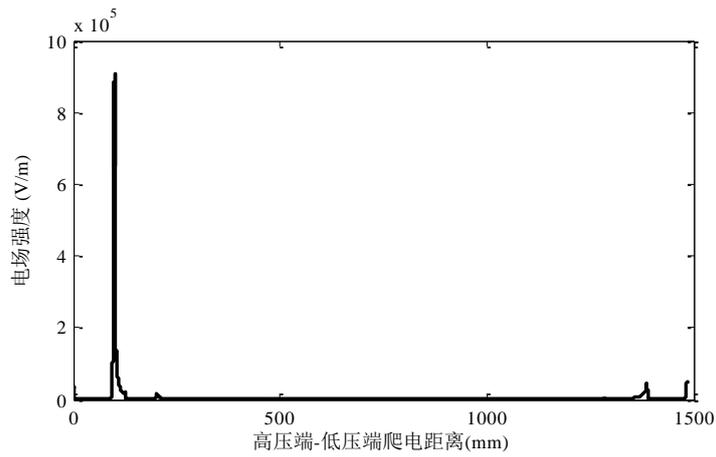
(b) 伞裙下表面 15mm 干燥带

图 5.9 伞裙下表面干燥带宽度对绝缘子沿面电场的影响

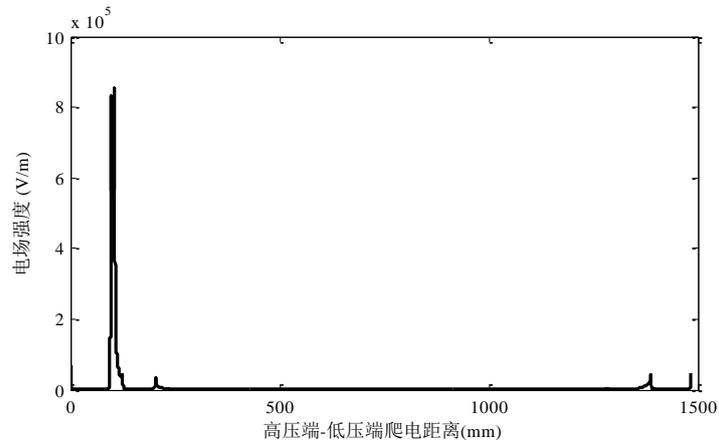


(c) 伞裙下表面 20mm 干燥带

图 5.9 伞裙下表面干燥带宽度对绝缘子沿面电场的影响

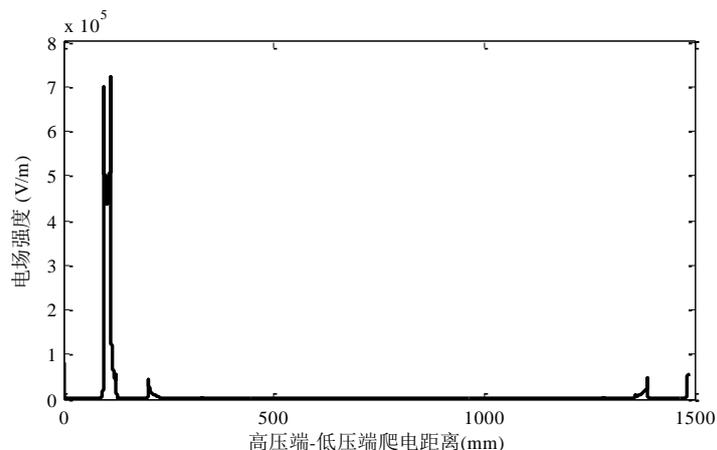


(a) 伞裙间柱体上 5mm 干燥带



(b) 伞裙间柱体上 10mm 干燥带

图 5.10 伞裙间柱体处干燥带宽度对绝缘子沿面电场影响

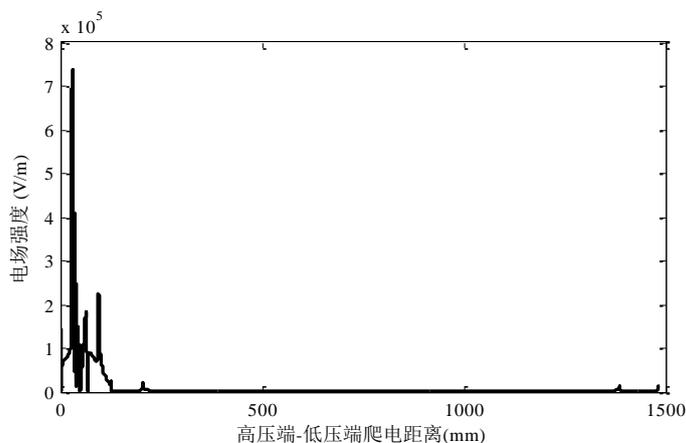


(c) 伞裙间柱体上 15mm 干燥带

图 5.10 伞裙间柱体处干燥带宽度对绝缘子沿面电场影响

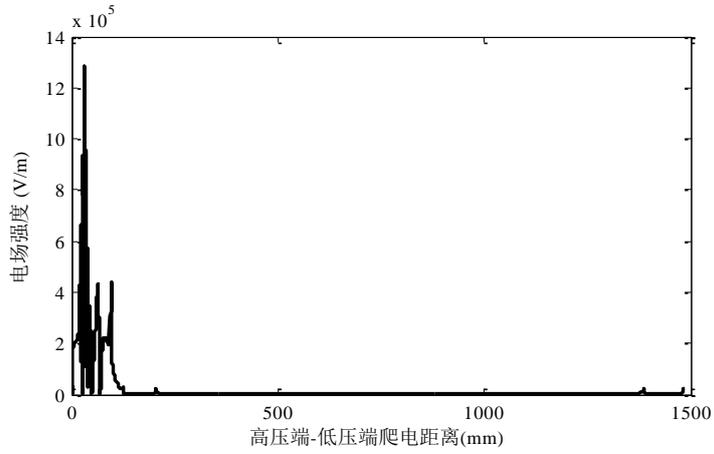
由图 5.8(a)~图 5.8(c)知,伞裙表面产干燥带的宽度分别 10mm、15mm、20mm 时干燥带处最大场强分别为  $3.7 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $3.9 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $4.8 \times 10^5 \text{V/m}$ 。所以伞裙表面干燥带处场强最大值随着干燥带宽度的增加而增大。如图 5.9(a)~图 5.9(c)所示,伞裙下表面干燥带宽度为 10mm、15mm、20mm 处,场强最大值为  $3.1 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $3.6 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $4.1 \times 10^5 \text{V/m}$ 。本文选取柱体上干燥带宽度分别为 5mm、10mm、15mm 进行分析。由图 5.10(a)~图 5.10(c)知,柱体上干燥带宽度分别为 5mm、10mm、15mm 时,最大电场强度分别为  $8.6 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $8.3 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $7.2 \times 10^5 \text{V/m}$ ,且最大值均出现干燥带的端部。柱体上场强最大值变化情况与伞裙上、下表面相反,干燥带宽度越大,最大场强逐渐减小。

#### 5.4 干燥带数目对绝缘子沿面电场分布影响

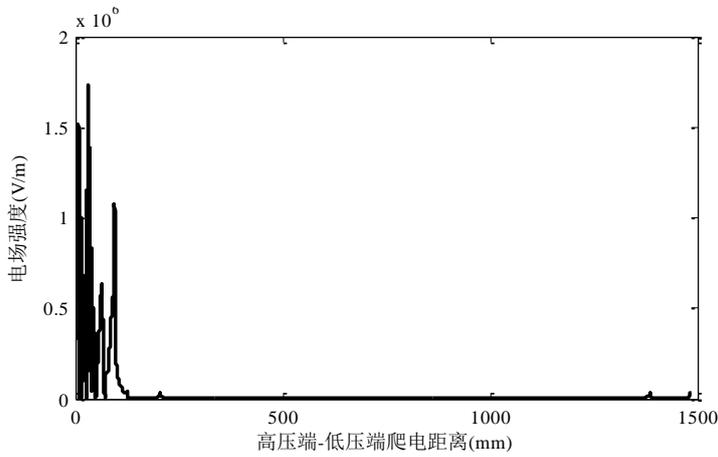


(a) 伞裙上 4 条干燥带

图 5.11 伞裙表面干燥带数目对绝缘子沿面电场影响

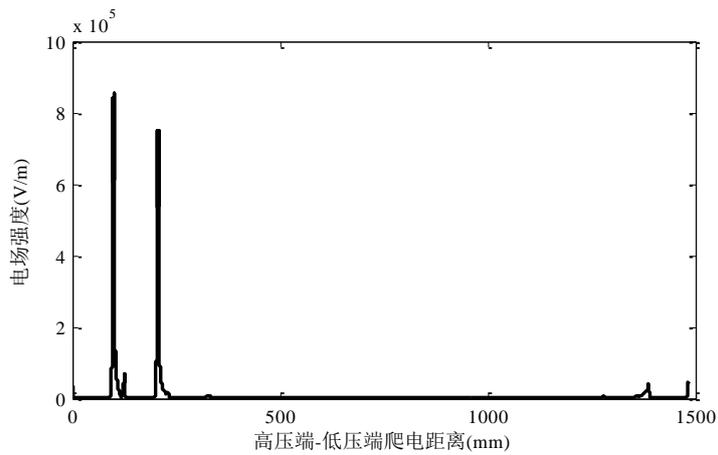


(b) 伞裙上 6 条干燥带



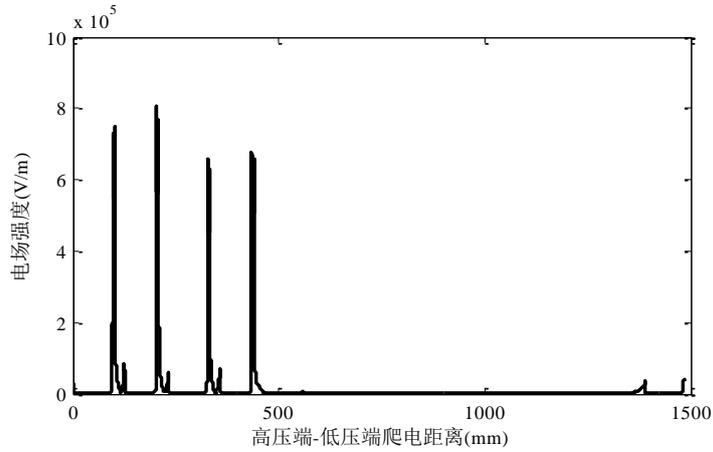
(c) 伞裙上 8 条干燥带

图 5.11 伞裙表面干燥带数目对绝缘子沿面电场影响

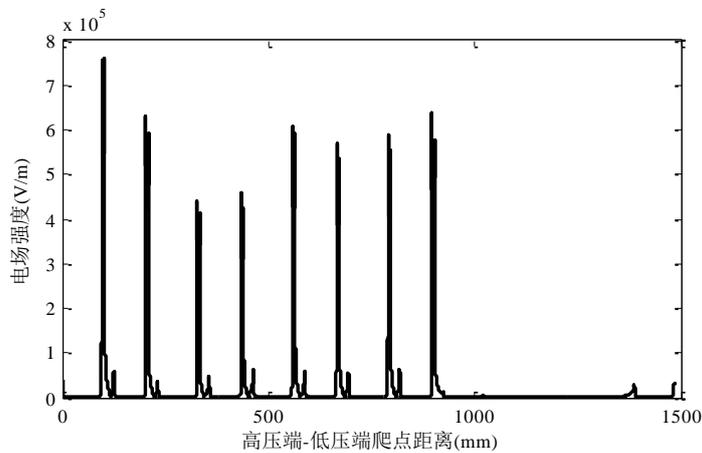


(a) 柱体上 2 条干燥带

图 5.12 整个绝缘子伞间柱体上干燥带数目对沿面电场影响



(b) 柱体上 4 条干燥带



(c) 柱体上 8 条干燥带

图 5.12 整个绝缘子伞间柱体上干燥带数目对沿面电场影响

实际情况中由于受到自然条件和泄漏电流共同影响，绝缘子表面可能同时存在多条干燥带。本文分别分析了同一伞裙上出现多条干燥带，以及整个绝缘子柱体上存在多条干燥带时，干燥带处场强最大值变化情况。

如图 5.11(a)~图 5.11(c)所示，绝缘子伞裙表面干燥带数目分别为 4 条、6 条、8 条时，干燥带处绝缘子沿面最大场强分别为  $7.3 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $1.25 \times 10^6 \text{V/m}$ 、 $1.75 \times 10^6 \text{V/m}$ 。随着伞裙表面干燥带数目的增多，其场强最大值变化比较明显且相应增大。如图 5.12(a)~图 5.12(c)所示，当每个伞群间柱体上仅有一条干燥带出现，整个绝缘子柱体上分别产生 4 条、6 条、8 条干燥带时，其对应的沿面最大场强值分别为  $8.7 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $8.1 \times 10^5 \text{V/m}$ 、 $7.8 \times 10^5 \text{V/m}$ ，这与文献[3]中所计算的与柱式复合绝缘子结构相似的瓷支柱绝缘子干燥带处电场变化趋势相同如表 5.2 所示。因此当整个绝缘子柱体上干燥带数目逐渐增多时，其沿面场强最大值逐渐减小。

表 5.2 绝缘子柱体上干燥带数目对电场影响对比

柱式复合绝缘子		瓷支柱绝缘子	
干燥带数目	电场强度	干燥带数目	电场强度
2	8.7kV/cm	2	6.55MV/m
4	8.1kV/cm	3	5.31MV/m
8	7.8kV/cm	4	4.48MV/m

## 5.5 小结

分析了干燥带对接触网复合绝缘子沿面电场分布的影响。接触网棒形柱式复合绝缘子伞裙间柱体处泄漏电流最大，最易出现干燥带。当绝缘子伞裙表面出现干燥带时，伞裙上、下表面干燥带处的场强最大值，随着干燥带宽度的增大而增大，且最大值出现在靠近柱体侧干燥带端部，而伞裙间柱体上最大值随着干燥带宽度的增加而减小。当绝缘子伞裙和柱体表面出现多条干燥带时，干燥带数目对场强最大值影响较为明显，随着伞裙上干燥带数目的增多，场强最大值显著增大，而柱体上干燥带数目的增多，场强最大值有所降低。

## 结 论

本文的研究对象为铁路常用复合绝缘子 FQBG-25/12，分别建立了洁净绝缘子、绝缘子表面覆沙、绝缘子表面出现干燥带三种情况下的仿真模型，采用人工截断法将绝缘子周围的空气由无限的开区域合理的设置成有限的闭区域，根据绝缘子的状态不同，选择了静电场和电准静态场两种场域对绝缘子进行电场分析，应用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件求解洁净绝缘子、表面覆沙绝缘子、表面出现干燥带绝缘子的沿面电场分布情况。

主要研究成果如下：

(1) 洁净绝缘子伞裙上电位和电场分布趋势相似度较高，整个绝缘子沿面电场分布类似“U”形分布。

(2) 绝缘子表面覆着带电沙粒时，沙粒处绝缘子电场发生畸变。沙粒的粒径、沙粒的带电量、沙粒的极性和覆着位置均对电场分布有影响。接触网复合绝缘子表面覆有不同粒径的沙粒时，对绝缘子电场强度畸变程度不同；随沙粒粒径的增大，沙粒处绝缘子电场强度也小幅增大。带电沙粒对绝缘子沿面电场分布有较大的影响，电场强度随着沙粒带正负电荷量绝对值的增大而增大。绝缘子沿面电场分布受沙粒极性和覆着位置的影响明显。伞裙上表面，负电荷量沙粒对电场畸变程度高于正电荷量沙粒；相反，伞裙下表面，正电荷量沙粒对电场的畸变程度高于负电荷量沙粒。

(3) 接触网棒形柱式复合绝缘子伞裙间柱体处泄漏电流最大，最易出现干燥带。当绝缘子伞裙表面出现干燥带时，伞裙上、下表面干燥带处的场强最大值，随着干燥带宽度的增大而增大，且最大值出现在靠近柱体侧干燥带端部，而伞裙间柱体上最大值随着干燥带宽度的增加而减小。当绝缘子伞裙和柱体表面出现多条干燥带时，干燥带数目对场强最大值影响较为明显，随着伞裙上干燥带数目的增多，场强最大值显著增大，而柱体上干燥带数目的增多，场强最大值有所降低。

论文需要进一步的研究方向有：

(1) 研究接触网复合绝缘子表面覆着水珠时，水珠的大小、水珠与绝缘子表面的接触角、水珠间距、水珠数量等因素对绝缘子沿面电场分布的影响。

(2) 研究接触网瓷绝缘子和复合绝缘子两种不同类型的绝缘子表面潮湿污秽和悬浮沙粒共同作用下其沿面电场分布特性。

## 致 谢

研究生三年的学习时光已经接近尾声，在此我想我的老师、父母和同学表示由衷的感谢。

感谢张友鹏老师三年来对我的关心和照顾，他在忙碌的工作中挤出宝贵的时间来审查和修改我的论文。他渊博的专业知识、严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，宽以待人的崇高风范，平易近人的人格魅力给我在学习和工作之路树立了榜样。本文从选题到完成每一步都在老师的指导下完成，倾注了老师的心血。

感谢父母在我求学路上对默默关心与鼓励，给我无私的爱，让我一步步顺利成长。感谢赵珊鹏师兄、董海燕师姐在选题时给我的宝贵意见，以及在写论文时认真的指导。

## 参考文献

- [1] 尹晓惠,王式功.我国北方沙尘暴与强沙尘暴过程的分形特征及趋势预测[J].中国沙漠,2007,27(1):130-136.
- [2] 冯鑫媛,王式功,程一凡等.中国北方中西部沙尘暴气候特征[J].中国沙漠,2010,30(2):394-399.
- [3] 贺博,万军,陈邦发等.人工模拟沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究[J].西安交通大学学报,2008,42(12):1510-1514.
- [4] 吴亮.沙尘环境下空气间隙和平板模型沿面放电特性的研究[D].重庆:重庆大学,2008:26-46.
- [5] 司马文霞,吴亮,杨庆.沙尘对电力系统外绝缘电气特性影响分析[J].高电压技术,2008,34(1):16-20.
- [6] 马高权.风沙环境下绝缘沿面放电特性研究[D].重庆:重庆大学,2009:19-49.
- [7] 司马文霞,程浩,杨庆等.沙尘环境下绝缘子交流闪络特性及机理[J].高电压技术,2011,37(4):834-840.
- [8] Qureshi M. I.,Al-Arainy A. A.,Malik N. H..Influence of sand dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under switching impulses[J].IEEE Transactions on Electrical Insulation,1994,1(2):305-314.
- [9] Qureshi M. I.,Al-Arainy A. A.,Malik N. H..Performance of protective rod gaps for medium voltage networks in the presence of dust particles under lightning impulses[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(4):1311-1315.
- [10] Mohamed M. A., Hassan M. S., Arafa B. A.,et al. Effect of sandstorms with charged particles on the flashover and breakdown of transmission lines[A].In: International Conference on Large HV Electric Systems[C].Paris: CIGRE,2002:1-5.
- [11] 于万聚.高速电气化铁路接触网[M].成都:西南交通大学出版社,2003:193-196.
- [12] 隋彬,孙继星,吴广宁.间歇性列车风对支撑绝缘子污闪影响分析[J].电瓷避雷器,2012,(2):1-5.
- [13] 郑晓静,黄宁,周又和.风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J].力学进展,2004,34(1):77-86.
- [14] 孙才新,顾乐观,谢军等.染污绝缘子沿面电场分布与局部电弧发展的关系[J].中国科学,1991,(10):1113-1120.
- [15] 顾乐观,张建辉,孙才新.染污光滑圆柱绝缘子沿面电场分布对闪络过程的影响[J].中国电机工程学报,1993,13(增刊):70-75.
- [16] 郑殿春.绝缘结构电场分布有限元法与应用[M].北京:科学出版社,2012:48-56.
- [17] Zeng R.,Zhang Y.,Chen W. Y..Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008,15(1):302-310.
- [18] 倪光正,杨仕友,邱捷等.工程电磁场数值计算[M].北京:机械工业出版社,2012:124-140.
- [19] 沈鼎申,张孝军,万启发等.750kV 线路绝缘子串电压分布的有限元计算[J].电网技术,2003,27(12):54-57.
- [20] 徐志钮,律方成.绝缘材料及其参数对绝缘子表面电场强度和电位分布的影响[J].电网技术,2011,32(9):152-157.

- [21] 杨艳,李钊年.高海拔地区 750kV 复合绝缘子均压环电场仿真及结构优化[J].绝缘材料,2015,48(1):70-73.
- [22] 蒋兴良,刘毓,张志劲等.覆冰地区交流输电线路复合绝缘子伞裙结构的电场分布优化[J].高电压技术,2013,39(1):210-217.
- [23] Zhao S. P.,Zhang Y. P.,Chen Z. D..Calculation of electric field characteristics of insulator under sandstorm condition[J].TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering,2014,12(2): 1169-1176.
- [24] Gill E. W. B..Frictional electrification of sand[J].Nature,1948,18(4):568-569.
- [25] Latham J..The electrification of snowstorms and sandstorms[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1964,90(5):91-95.
- [26] 屈建军,言穆宏,董光荣等.沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J].中国科学,2003,33(6):593-601.
- [27] 屈建军,俎瑞平.扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟实验[J].中国沙漠,2004,25(5):534-538.
- [28] Schmidt D. S.,Dent J. D..A theoretical of the effects of electrostatic forces on saltating snow particles[J].Annals of Glaciology,1993,18(2):234-238.
- [29] Schmidt D. S..Electrostatic force on saltating sand[J].Journal of Geophysical Research, 1998,103(4): 8997-9001.
- [30] Zhang H. F.,Wang T.,Qu J. J.,et al.An experimental and observational study on the electric effect of sand storm[J].Chinese Journal of Geophysics,2004,47(1):47-53.
- [31] 司马文霞,马高权,杨庆.风沙条件下的平板模型直流沿面放电特性[J].高电压技术,2008,34(12): 2570-2574.
- [32] 司马文霞,杨庆,吴亮等.平板模型沿面工频沙尘闪络特性的试验研究及放电机制分析[J].中国电机工程学报,2010,30(1):6-13.
- [33] Sima W. X.,Yang Q.,Ma G. Q..Experiments and analysis of sand dust flashover of the flat platemodel[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(2):572-581.
- [34] 程浩.沙尘环境下绝缘子交流闪络特性的研究[D].重庆:重庆大学,2011:33-44.
- [35] Zhong Y.,Peng Z. R.,Liu P.,et al.The influence of charged sand particles on the external insulation performance of composite insulators in sandstorm condition[A].In:Properties and Applications of Dielectric Materials.8th International Conference[C].Bali:IEEE,2006:542-545.
- [36] 张友鹏,赵珊鹏,陈志东等.悬浮沙粒对棒形绝缘子电位和电场分布的影响[J].高电压技术,2014,40(9):2707-2711.
- [37] 赵珊鹏.沙尘环境下接触网绝缘子电场分布的仿真研究[D].兰州:兰州交通大学,2014:32-42.
- [38] 高博,王清亮,周建博等.干燥带对污秽绝缘子电场分布的影响[J].高电压技术,2009,35(10): 2422-2425.
- [39] 徐志钮,律方成,李和明.干燥带对染污支柱绝缘子电场分布的影响[J].高电压技术,2011, 37(2):276-282.
- [40] 王振华.硅橡胶绝缘子表面干燥带放电与气压影响的研究[D].天津:天津大学,2007:11-16.
- [41] 谭克雄,薛家麒.高压静电场数值计算[M].北京:水利水电出版社,1990:1-2.
- [42] 吴宗汉.基础静电学[M].北京:北京大学出版社,2010:2-15.
- [43] 倪光正.工程电磁场原理(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2009:38-79.

- [44] 金建铭.电磁场有限元方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,1998:8-21.
- [45] 王刚,安琳.COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M].北京:电子工业出版社,2012:67-86.
- [46] 中华人民共和国铁道行业标准,TB/T3199.1-2008,电气化铁路接触网用绝缘子第二部分:棒形柱式复合瓷绝缘子[S]:2-8.
- [47] 中华人民共和国国家标准,GB/T1402-2010,轨道交通牵引供电系统电压[S]:3-4.
- [48] 舒立春,张仕焜,蒋兴良等.覆冰圆柱绝缘子起弧前电位与电场分布研究[J].中国电机工程学报,2012,32(31):106-113.
- [49] 王颖,马西奎,邱关源.渐近边界条件在轴对称无界高压静电场计算中的应用[J].高电压技术,1997,23(1):26-30.
- [50] 司马文霞.染污悬式绝缘子表面电场分布及闪络机理的研究[D].重庆:重庆大学,1994:22-23.

## 攻读学位期间的研究成果

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1] 张友鹏,陈志东,赵珊鹏等.干燥带对接触网复合绝缘子电场分布的影响[J].铁道学报,(录用).
- [2] 张友鹏,陈志东,赵珊鹏. Electric Field Calculation Along the Surface of Composite Insulator Covered With Sand Grains Based on Finite Element Method[J].Journal of Information & Computational Science,2015,12(2):611-622.
- [3] 张友鹏,赵珊鹏,陈志东等.悬浮沙粒对棒形绝缘子电位和电场分布影响仿真分析[J].高电压技术,2014,40(9):2701-2713.

攻读硕士学位期间参与的科研项目

- [1] 沙尘地区电气化铁路接触网绝缘失效风险与在线检测关键技术的研究.中国铁路总公司科技研究开发计划课题,2012年6月-2014年12月,2012J007-C.参与.