

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: 沙尘环境下接触网绝缘子电场
分布的仿真研究

研究生姓名: 赵珊鹏 学号: 0211478

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: 交通信息工程及控制

论文提交日期: 2014. 6. 12 论文答辩日期: 2014. 6. 8

硕士学位论文

沙尘环境下接触网绝缘子电场分布的仿真研究

Simulation Research on Electric Field Distribution Along Catenary Insulator in Sand-dust Environment

作者姓名： 赵珊鹏
学科、专业： 交通信息工程及控制
学 号： 0211478
指导教师： 张友鹏 教授
完 成 日 期： 2014 年 4 月 22 日

兰 州 交 通 大 学
Lanzhou Jiaotong University

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含获得 兰州交通大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名： 签字日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 兰州交通大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 兰州交通大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名： 导师签名：

签字日期： 年 月 日 签字日期： 年 月 日

摘 要

我国西北地区植被稀疏,土地荒漠化导致的沙尘暴已经严重影响了铁路运输生产的安全运行。沙尘天气不仅加速了沙尘在绝缘子表面的沉积,还使绝缘子周围的清洁空气变成了空气和悬浮沙粒的混合媒质,并且在空间中形成了强烈的沙尘电场。工作环境的改变会影响绝缘子的电场分布,从而可能导致闪络,研究沙尘环境下接触网绝缘子的电场分布可为同环境下绝缘子闪络等相关研究提供参考依据。

本文以电气化铁路接触网专用的 QBN-25 型号腕臂棒形瓷绝缘子为研究对象,基于静电场有限元法建立了沙尘环境下绝缘子电场数值计算的仿真模型。应用人工截断法设置合理的空气域边界,将绝缘子电场分布问题的求解由无限开区域转化为有限闭区域,并设置无限元区域解决了绝缘子电场的远场耗散问题。针对悬浮沙粒数量巨大,普通计算机无法计算的问题,根据模型的轴对称特性和网格剖分的可操作性,制作了完整几何模型的简化模型,大幅提高了仿真效率。应用 COMSOL Multiphysics 有限元软件计算分析了在绝缘子表面覆沙、沙尘电场、空气中悬浮沙粒等沙尘环境下绝缘子沿面电场的分布特性。

仿真结果表明:绝缘子沿面电位和电场分布受绝缘子几何形状影响明显;绝缘子表面沉积沙尘会降低覆沙处的场强;当沙层中出现无沙带时,无沙带处的场强将会升高;沙尘电场会使绝缘子圆周方向的电场发生改变;空气中悬浮的电中性沙粒可小幅畸变绝缘子沿面电位和电场;悬浮沙粒带上相同的电量后,绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度加大,其畸变幅度受悬浮沙粒的粒径、数量、带电量的大小和极性影响明显;混合粒子群对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度受粒子群中沙粒的带电特性影响明显。各种沙尘环境均会不同程度畸变绝缘子沿面电场,各具特点,悬浮沙粒带电是绝缘子沿面电场畸变的重要原因。

关键词: 沙尘环境; 接触网; 绝缘子; 有限元法; 电场分布

论文类型: 应用基础研究

Abstract

The desert regions of northwest China is widely distributed, sandstorm caused by land desertification have seriously affected the operation security of the railway transportation, which have drawn worldwide attention. Sandstorm not only accelerates the sand deposition rate on the surface of insulator, but also changes the clean air around insulator into the mixed media of air and sand. Sandstorm can distort the original electric field distribution along insulator. The electric field strength along insulator is closely related to the flashover. The study could provide theoretical basis for the related research of insulator flashover under sand-dust environment.

The analysis model of this thesis is the long rod ceramic insulator of QBN-25 type, which is used in the catenary system of electrified railway. To study the influence of the sand-dust environment on the electric field distribution along insulator, the simulation model of long rod ceramic insulator based on the finite element method of electrostatic field is established. The air area size of simulation model is defined reasonably, and the infinite element area is set to solve the dissipation problem of far field. According to the axisymmetric characteristics of the model and the maneuverability of meshing, a simplified model of the complete simulation model is establish to reduce the computational scale. The simulation efficiency is improved obviously. The software of COMSOL Multiphysics is used to calculate and analyse the electric field distribution along insulator in different sand-dust environment, such as deposition of sand-dust, electric field of sand-dust weather and suspended sand particles.

The results of simulation show that electric field strength along insulator are influenced by the geometry of insulator. The sand deposition decreases the electric field strength of insulator surface covered with sand. The electric field strength of the non-sand region will be higher than that of the nearby sand layer, when the non-sand region appears in the sand layer on insulator. Under the action of the additional electric field of different sand-dust weather, the electric field strength along insulator is not the same as the circumferential direction of insulator. The potential and electric field strength along insulator will be distorted slightly by suspended uncharged sand particles. The distortion will be increased significantly when the suspended sand particles carry the same charge. The quantity, diameter, charge-to-mass ratio, and charge polarity of suspended sand particles have a great influence on the distortion of the potential and electric field strength along insulator. The distortion of the electric field strength along insulator with the hybrid particle swarm of charged and uncharged sand particles or with the hybrid particle swarm of positive and negative sand particles is smaller than that with all the sand particles carrying the same charge in the swarm. Electric field strength along

insulator is distorted in different degrees by different sand-dust environments, and the charged sand particle is the main reason of the distortion.

Key Words: Sand-dust environment, 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 有限元法原理	7
2.3 COMSOL Multiphysics 有限元软件	8
2.3.1 软件介绍	8
2.3.2 仿真流程	9
2.4 小结	10
3 清洁环境下接触网绝缘子电场分布	11
3.1 接触网绝缘子仿真模型的建立	11
3.1.1 QBN-25 型号接触网棒形瓷绝缘子	11
3.1.2 人工截断法的应用	12
3.1.3 无限元区域的应用	14
3.1.4 网格剖分	14
3.2 绝缘子电位分布	15
3.3 绝缘子电场分布	16
3.4 绝缘子几何形状对沿面电位和电场的影响	17
3.5 计算方法的验证	20
3.6 小结	20
4 表面覆沙与沙尘电场作用时接触网绝缘子电场分布	21
4.1 绝缘子表面覆沙时绝缘子电场分布	21
4.1.1 沙层沉积于伞裙上表面	21
4.1.2 沙层中出现环状无沙带	22
4.2 沙尘电场作用时绝缘子电场分布	24

4.2.1 沙尘电场数据的获取	24
4.2.2 绝缘子电场分布特性	25
4.3 小结	31
5 悬浮沙粒时接触网绝缘子电场分布	32
5.1 三维仿真模型的简化	32
5.2 绝缘子电位分布	33
5.3 绝缘子电场分布	36
5.4 小结	42
结 论	43
致 谢	44
参考文献	45
攻读学位期间的研究成果	48

1 绪论

1.1 选题背景和意义

我国西北地区戈壁和沙漠广布，风力资源充足，常年降水稀少，地表植被稀疏，生态环境较为恶化^[1,2]。截止到 2005 年，我国西北五省（新疆、甘肃、青海、陕西、宁夏）沙漠化土地面积占据了全国沙漠化土地总面积的 58.53%，成为我国沙尘暴重要的发源地^[3,4]。风蚀荒漠导致强烈的沙尘暴已经造成了我国电力系统多起绝缘子闪络事故，严重影响了电力系统的安全可靠运行^[5-9]。在国外，沙尘暴天气也造成了诸多输电线路外绝缘闪络事故，“沙闪”逐渐引起了全世界高电压领域的广泛关注^[10-12]。

电气化铁路接触网是架设在铁路线上向电力机车供电的特殊高压输电线路^[13]，与电力系统相比，电气化铁路接触网安装高度低，同样沙尘天气下，接触网周围空气中沙尘浓度更大。列车运行时形成的气流会加速道床周围的沙尘扬起，故沙尘对接触网的侵害更为严重^[14]。近年来，沙尘天气导致的外绝缘闪络跳闸事故给铁路运输生产造成了很大损失。2002 年 9 月 14 日，沙尘暴的爆发导致接触网绝缘子闪络跳闸，乌鲁木齐发往郑州的 T198 次列车晚点 22 小时；2003 年 3 月 11 日，沙尘暴使乌鲁木齐开往北京的 T70 次列车晚点 22 小时；2006 年 4 月 9 日，新疆吐鲁番地区发生罕见的特强沙尘暴使乌鲁木齐发往北京的 T70 次列车晚点 32 小时；2006 年 4 月 10 日，沙尘暴导致由乌鲁木齐发往各地的 9 趟列车在兰州滞留，最长晚点达 26 小时；2010 年 4 月 24 日，甘肃省民勤县发生的大风沙尘暴天气导致乌鲁木齐发出东行的两趟列车晚点；2013 年 5 月 24 日，乌鲁木齐发往济南的 1086 次列车遭遇沙尘暴，晚点 7 小时。

绝缘子是接触网中使用量最大，且易受外界环境影响的重要高压外绝缘器件，起着保持接触网带电体与大地之间绝缘和支撑固定作用。沙尘天气加速了沙尘在绝缘子表面的沉积，并使绝缘子周围的媒质由清洁空气变成了空气和悬浮沙粒的气固两项混合媒质，且沙粒与大地之间以及沙粒之间非对称摩擦使沙粒带上了电荷，在空间中产生了强烈的沙尘电场^[15]，绝缘子表面积污、周围媒质和电磁环境的改变都会畸变绝缘子的电场分布。当绝缘子局部表面电场强度达到空气临界击穿场强时，绝缘子表面将会产生局部电弧，进而引发闪络，最终造成跳闸断电事故，所以绝缘子沿面电场畸变是造成绝缘子闪络的重要原因^[16-18]。因此，研究沙尘环境对接触网绝缘子沿面电场分布的影响是十分必要的。

绝缘子的沿面电场强度虽然可通过现场测量，但测量周期长、成本高、工作量大，且无法避免外界因素带来的误差^[19]。计算电场分布问题的方法主要有图解法、模拟法、解析法和数值计算方法四种方法，由于工程电磁场问题所涉及的电磁装置在结构、几何

形状和材料变化上具有相当的复杂性，前三种方法已经无法适应工程问题求解分析的需要^[20]。随着计算机技术的迅速发展，属于近似计算范畴的电磁场数值计算方法得到长足的发展，当今数值计算方法已经能满足科技领域和工程方面对于电磁场问题精确分析的需求，而且利用数值计算方法研究绝缘器件的电场分布已经成为高电压领域优化设计和分析的新趋势^[21-25]。

随着《中长期铁路网规划》的大力实施，我国西部地区电气化铁路里程将会大幅加，到 2015 年，西部地区铁路里程将会达到 30000km，更多的电气化铁路接触网将面临沙尘天气的侵害。分析沙尘环境下接触网绝缘子电场分布特性，可为绝缘子的闪络研究、接触网外绝缘设计及制定防污闪措施提供科学的理论依据，从而更好地保障牵引供电系统安全可靠运行。

1.2 国内外研究现状

因绝缘子周围空气中的带电悬浮沙粒及沙尘天气形成的沙尘电场对绝缘子电场分布具有明显影响，首先介绍国内外对此方面的研究现状：

Gill 等学者观测到沙尘暴会对无线电信号产生干扰，且在沙尘暴过境时会出现电火花与强电场的现象^[26]。Latham 等学者提出了非对称摩擦的概念，认为沙粒间非对称摩擦形成温度梯度导致正负电荷分离，从而使沙粒带上了电荷^[27]。中科院寒旱所屈建军等学者通过试验测量得出沙粒所带负电荷的最大荷质比为 $-304\mu\text{C/kg}$ ，沙粒所带正电荷最大荷质比为 $158\mu\text{C/kg}$ ，并认为沙粒与大地之间的非对称摩擦在沙粒带电的过程中起了主要的作用^[28,29]。

在对沙粒带电现象进行试验研究和观测的同时，国内外学者也对不同沙尘天气形成的沙尘电场进行了深入研究。Schmidt 等学者现场反复测量得出：晴天电场方向垂直于地面向上，而沙尘暴天气附加电场方向垂直于地面向上^[30,31]。中国科学院寒区旱区环境与工程研究所张宏发等学者针对不同沙尘天气产生的沙尘电场进行了现场实地测量，得出各沙尘天气所形成电场的极性和大小不同^[32]，在各沙尘天气下不同高度上的沙尘电场强度如表 1.1 所示。

表 1.1 各沙尘天气下不同高度上的沙尘电场强度

天气	16m (kV/m)	8m (kV/m)	4m (kV/m)	1m (kV/m)
浮 尘	0.956	5.229	2.756	0.832
扬 沙	-9.451	3.780	2.165	0.903
沙尘暴	-36.755	-6.899	-2.571	-0.308

目前国内外针对覆冰或表面污秽环境下绝缘子电位和电场分布的研究较多，而沙尘环境这种特殊工作环境下绝缘子电位和电场分布的相关研究相对较少，且研究主要集中在国内：

重庆大学司马文霞等学者以典型的平板模型为对象，通过试验研究分析了沙尘环境下平板模型的沿面闪络过程和放电机制，并仿真分析了覆沙和悬浮沙粒环境下平板模型的电场分布^[33-35]。并从电场的角度分析了沙层出现无沙带的成因，以及出现无沙带后平板模型的电场分布状况。沙粒沉积密度较小时，在电场集中的高压电极附近，在电场垂直分量的作用下，空气中的带电粒子碰撞沉积有沙粒的绝缘表面，从而导致了部分沙粒带上电荷。沙粒在法向电场力的作用下被慢慢“推开”，形成了无沙带，且无沙带逐渐扩大，并利用实验验证得出了无沙带在沿面闪络过程中起重要影响这一结论。但文中仿真模型为平板模型并非真实的绝缘子模型。

重庆大学程浩以 XP-70 盘型悬式瓷绝缘子为研究目标，建立沙尘环境下绝缘子电场分布的仿真模型^[36]。应用 COMSOL Multiphysics 有限元软件仿真分析了绝缘子沿面的电场分布。仿真结果表明：绝缘子的电场分布受附着在绝缘子表面沙尘的影响作用较小；当绝缘子表面的沙层中出现无沙带后，无沙带处的场强升高；空气中悬浮沙粒不带电时对绝缘子电场分布的影响作用不明显；空气中悬浮的带电沙粒会升高绝缘子沿面的场强，产生较大的畸变作用，且畸变幅度与沙粒的荷质比有关。但文中的仿真模型为单片的盘型悬式绝缘子，与实际的成串应用具有一定的差异。

西安交通大学彭宗仁等学者利用有限元法研究了带电沙粒对复合绝缘子外绝缘特性的影响，研究表明空气中带电沙粒可以明显畸变绝缘子的电场分布，并讨论了不同导电属性的沙粒对绝缘子电场分布的影响^[37]。但论文中的仿真结果较为简要，没有对仿真过程和结果进行详细的分析。

综上所述，前述的研究成果针对的绝缘类型较少，具有一定的局限性，而针对电气化铁路接触网应用环境下的专有型号绝缘子的研究仍鲜有报导。另外，现有文献均未考虑棒形绝缘子各伞裙表面覆沙、绝缘子周围空气中悬浮沙粒的粒径、沙粒的电荷极性、带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群、正负极性沙粒混合粒子群等重要因素对绝缘子沿面电场的影响。

1.3 主要研究内容

本文以电气化铁路接触网专用的 QBN-25 型号腕臂棒形瓷绝缘子为研究对象，结合已有文献未考虑的重要沙尘环境因素，基于静电场有限元法建立沙尘环境下绝缘子电场数值计算的仿真模型。应用 COMSOL Multiphysics 有限元软件计算分析了绝缘子在伞裙

表面覆沙、沙尘电场、空气中悬浮沙粒等沙尘环境影响下沿面电场的分布特性，主要研究内容包括以下几个方面：

- (1) 分析清洁环境下接触网绝缘子电位和电场分布特性，及绝缘子几何形状对沿面电位和电场分布的影响；
- (2) 分析绝缘子表面覆沙及沙层中出现无沙带时绝缘子沿面的电场分布特性；
- (3) 分析在不同沙尘天气附加电场作用下水平及倾斜安装绝缘子圆周方向的电场分布特性；
- (4) 分析绝缘子周围空气中悬浮沙粒的粒径、数量和沙粒所带电荷极性、大小等因素对绝缘子沿面电位和电场的影响，分析带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群、正负极性沙粒混合粒子群等重要因素对绝缘子沿面电位和电场的影响。

2 绝缘子电场分布的计算原理

电气化铁路接触网绝缘子工作在 50Hz 工频交流电压下，电压随时间的变化比较缓慢，绝缘子两端金具之间的绝缘距离远远小于工频电磁波的波长(6000km)，因此可以近似地认为绝缘子在任一瞬间的电场都是稳定的，故可采用静电场进行分析^[38,39]。

2.1 静电场原理

相对于观察者静止且量值不随时间变化的电荷所产生的电场，称为静电场。静电场是高压电气绝缘结构和放电现象研究等许多领域最常遇到的场，静电场的数值分析计算在电力设备的设计和优化中有着极为重要的作用^[40,41]。

静电场积分形式的方程为

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

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

其中， $\mathbf{S}$ 为静电场中任意闭合的有向曲面； V 为 $\mathbf{S}$ 限定的体积； $\mathbf{D}$ 为电通量密度，单位是 C/m^2 ； ρ 为电荷体密度，单位是 C/m^3 ； l 为静电场中任意闭合的有向曲线； $\mathbf{E}$ 为电场强度，单位是 V/m 。

静电场微分形式的方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.1)$$

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

其中，算子 ∇ 描述了空间三个坐标轴上的偏微分乘上相应单位矢量之和。在直角坐标系中可以写成

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

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

表明场量与媒质特性关系的媒质构成方程为

$$\mathbf{D} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.2)$$

其中， ε_r 为相对介电常数，无量纲； ε_0 为真空介电常数，值是 $8.85 \times 10^{-12} F/m$ ； ε 为媒质的介电常数，单位是 F/m 。

静电场的电场强度 $\mathbf{E}$ 可以由一个标量函数 φ 表示

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi \quad (2.3)$$

其中，标量函数 φ 称为静电场的标量电位函数，单位是 V。将式 2.2 和式 2.3 代入式 2.1 中，可得

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

对于均匀媒质，可得

$$\nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.4)$$

式 2.4 即为静电场电位 φ 的泊松方程， ∇^2 称为拉普拉斯算子，在直角坐标系中

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

对于场中无自由电荷分布($\rho=0$)的区域，则成为电位 φ 的拉普拉斯方程

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

作为完整的数学模型构造，在源于静电场基本方程的泊松方程和拉普拉斯方程，即泛定方程，给出“共性”描述的基础上，还必须以实际物理问题为背景，给出所谓的定解条件，即待求电磁场问题的“个性”描述。然后，由泛定方程与定解条件的组合方能构成一个对应于具体物理问题，在数学上有唯一定解的偏微分方程的定解问题。泊松方程和拉普拉斯方程都属一元二次线性偏微分方程，这类偏微分方程的定解条件是在方程定义域（场域）的边界上给定的边界条件（边值），通常有下列三种情况：

(1) 第一类边界条件

已知场域边界面 Γ 上各点的电位值，即给定

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

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

(2) 第二类边界条件

已知场域边界面 Γ 上各点的法向导数，即给定

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

其中, $\mathbf{n}$ 表示分界面的单位法向量。

(3) 第三类边界条件

已知场域边界面 Γ 上各点电位和电位法向导数的线性组合的值, 即给定

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

因此, 静电场边值问题就是在给定第一类、第二类或第三类边界条件下, 求电位函数 φ 的泊松方程或拉普拉斯方程的定解问题。当场域中存在多种媒质时, 则对于由不同均匀媒质或有无电荷分布所界定的各个子场域, 应分别写出各子场域对应的泊松方程和拉普拉斯方程。然后作为定解条件, 还必须相应地引入不同媒质分界面上的边界条件

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

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

其中, “+” 和 “-” 分别表示沿分界面的正法线方向和负法线方向趋于分界面的极限值; σ 表示媒质分界面上的电荷面密度, 单位是 C/m^2 ; ε_1 、 ε_2 表示两种不同媒质的介电常数。这类定解条件也常称为辅助的边界条件 (衔接条件)。

2.2 有限元法原理

与有限差分法、模拟电荷法、表面电荷法、边界元法等数值计算方法相比较, 有限元法更加适应沙尘环境下绝缘子电场分布的求解。因为沙尘环境下绝缘子电场计算模型的边界几何形状和媒质物理性质变异情况十分复杂, 而有限元法的应用不受边界几何形状和媒质物理性质变异情况复杂程度的限制, 并且第二类边界条件和第三类边界条件是自动满足的, 不必单独处理。有限元法配置离散点较为便捷, 并且取决于单元差值函数和有限单元剖分密度的选取, 可以充分保证工程所需的计算精度。从数值计算的发展前沿来看, 有限元法本身适应性强, 在应用方面有很大的潜力, 使得有限元商业软件具有很强的通用性。随着计算机技术的发展, 有限元法已经成为涉及众多科技领域的一种高效实用的数值计算方法^[18,20]。

有限元法理论上以变分原理为基础, 把所要求解的微分方程型数学模型—边值问题, 转化为泛函求极值问题, 也就是等价的变分问题; 然后通过离散化处理 (剖分插值) 构造成分片解析的有限元子空间, 把变分问题近似地转化为有限元子空间中的多元函数极值问题, 后者又等价于一组多元代数方程组。求得代数方程组的解作为所求边值问题

的近似解。有限元法的核心在于剖分插值，它是将所研究的连续场分割为有限个单元，然后用比较简单的插值函数来表示每个单元的解^[18,20,42]。

沙尘环境下绝缘子的三维静电场边值问题为

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} & (x, y, z \in G) \\ \varphi = U_0 & (x, y, z \in \Gamma_1) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = 0 & (x, y, z \in \Gamma_2) \\ \left(\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^- - \left(\varepsilon_2 \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \right)^+ = \sigma & (x, y, z \in \Gamma_{in}) \end{cases} \quad (2.5)$$

其中， G 为所求场域； Γ_1 为绝缘子两端金具上的已知电位边界； Γ_2 为简化模型的对称截面边界； Γ_{in} 为不同媒质分面边界（如沙粒表面）。将式 2.5 转化为等价的泛函极值问题（变分问题），即求式 2.6 泛函的极小值问题

$$\begin{cases} I(\varphi) = \iiint_G \left\{ \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] - \rho \varphi \right\} dx dy dz \\ \varphi|_{\Gamma_1} = U_0(x, y, z) \end{cases} \quad (2.6)$$

经过剖分和插值的离散化过程，将变分问题化为多元函数的极值问题，得到线性方程组

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

其中， $\mathbf{K}$ 为经过强加边界条件处理后的 n 阶矩阵， n 是未知量或结点总数； $\boldsymbol{\varphi}$ 为 n 阶电位列向量； $\mathbf{P}$ 为 n 阶载荷列向量。由式 2.7 可求出场域剖分单元节点上的电位值，进而由式 2.3 可求出绝缘子的电场强度。

2.3 COMSOL Multiphysics 有限元软件

应用 COMSOL Multiphysics 有限元软件对沙尘环境下接触网绝缘子电场分布进行仿真求解。

2.3.1 软件介绍

COMSOL Multiphysics 是一款基于有限元理论的大型数值计算软件，以偏微分方程为研究对象，解决科研和工程中能用偏微分方程描述的各种问题，在全球领先的数值仿真领域里得到了广泛的应用^[43]。COMSOL Multiphysics 是以有限元法为基础，通过求解

偏微分方程（单场）或偏微分方程组（多场）来实现真实物理现象的仿真，用数学方法求解真实世界的物理现象。它是集前处理、求解器和后处理于一体的有限元 CAE 软件，提供了良好的图形用户界面和建模工具，软件界面如图 2.1 所示。

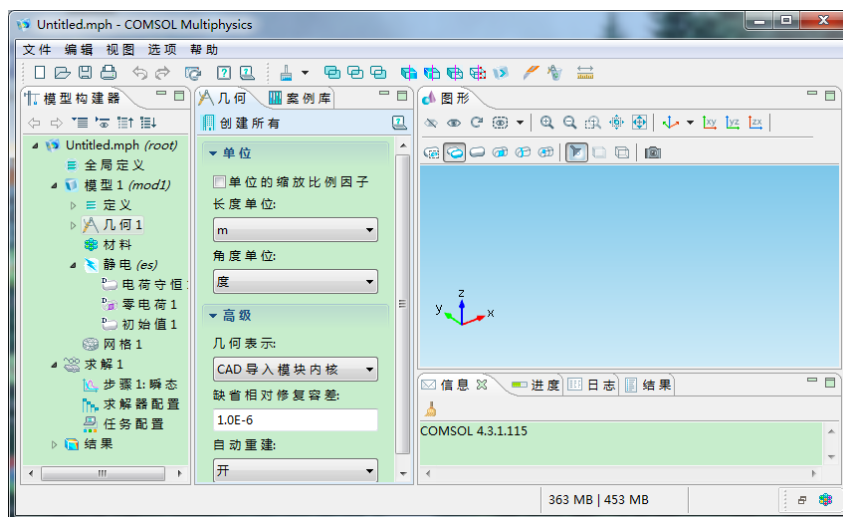


图 2.1 COMSOL Multiphysics 软件界面截图

2.3.2 仿真流程

基于 COMSOL Multiphysics 有限元软件的仿真计算主要包括以下步骤：

(1) 建立几何模型

根据仿真对象建立相应的几何模型，可以采用 COMSOL Multiphysics 内置的绘图工具进行一维、二维和三维建模。另外，COMSOL Multiphysics 支持多种主流 CAD 软件的数据格式，对于一些复杂的模型，可以将专业 CAD 软件绘制的几何模型导入软件中。同时，可以利用软件的与 Pro/Engineer、SolidWorks 和 Inventor 等软件的双向实时连接功能，大幅提高导入模型的效率。

(2) 定义物理参数和边界条件

对几何模型中各媒质设置相应的物理参数，模型的物理参数可以是各向同性，也可以是各向异性的，例如工程电磁场问题中的电导率和介电常数等。同时，参数也可以设置成是时间和空间的函数。定义几何模型和环境之间接触面的边界条件，也可以设定几何模型内部接触面的边界条件。在不同模式下，相同的边界可以定义不同的边界条件。

(3) 剖分有限元网格

可以根据几何模型的实际情况手动设置网格剖分的疏密程度。COMSOL Multiphysics 具有自适应式网格划分的功能，生成网格的算法与实际模型的求解方程、

算法特征相关联，对于提高有限元分析的精度是十分有效的。

(4) 求解

通常 COMSOL Multiphysics 会根据用户的模型，自动选择求解器。用户可以根据实际情况进行修正，例如小规模仿真，推荐采用直接式求解器；大规模仿真，则推荐采用迭代式求解器。

(5) 后处理

为了分析仿真结果，COMSOL Multiphysics 提供了很多后处理和可视化工具，如图形化、剖面图、域图、全局变量图、数据显示、生成动画、导出后处理结果、导出图、生成报告等。同时，软件与 MATLAB 完全兼容，可以进一步的优化设计和处理。

基于 COMSOL Multiphysics 有限元软件的电位和电场仿真计算流程如图 2.2 所示。

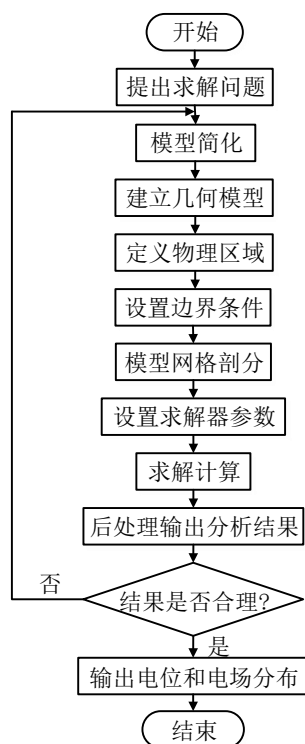


图 2.2 COMSOL Multiphysics 软件求解电位和电场流程图

2.4 小结

阐述了静电场边值问题和有限元法求解的基本原理，建立了沙尘环境下绝缘子电位和电场分布的静电场有限元法求解的数学模型，并介绍了 COMSOL Multiphysics 有限元软件的特点和仿真流程。

3 清洁环境下接触网绝缘子电场分布

绝缘子沿面电位和电场的分布是绝缘子几何形状、工作电压、相关材料属性、工作环境等因素共同作用的结果。为了与沙尘环境进行对比，首先计算了清洁环境下（绝缘子周围空气清洁、表面清洁、无外加电场）绝缘子的电位和电场分布。

3.1 接触网绝缘子仿真模型的建立

3.1.1 QBN-25 型号接触网棒形瓷绝缘子

电气化铁路接触网专用的腕臂用棒形绝缘子是接触网带电体与支柱设备或其他接地体保持电气绝缘的重要部件，同时也是在接触网中应用量最大的绝缘器件之一^[20]。如图 3.1 所示，腕臂用棒形绝缘子安装在腕臂的端部与支柱相连，分为水平安装与倾斜安装，用以支持接触悬挂，并起传递负荷的作用。棒形绝缘子结构简单，相比于盘型绝缘子，棒形绝缘子具有不可击穿性的特点，损坏率低，不必检测零值。整个绝缘子只在其两端有金具结构，所以大大减少了金属材料的用量，减轻了绝缘子的重量。由于棒形绝缘子的瓷体是用高铝瓷制成，使得绝缘子的机电应力被分离，几乎不含有任何内部应力，因而性能卓越。棒形绝缘子的爬电距离分纵向（芯棒）与横向（伞裙）两部分^[44-46]。棒形绝缘子具有自洁性能好的特点，接触网应用棒形绝缘子可以有效提高线路运行的可靠性，减少线路的清扫和维护工作，节约运行成本。

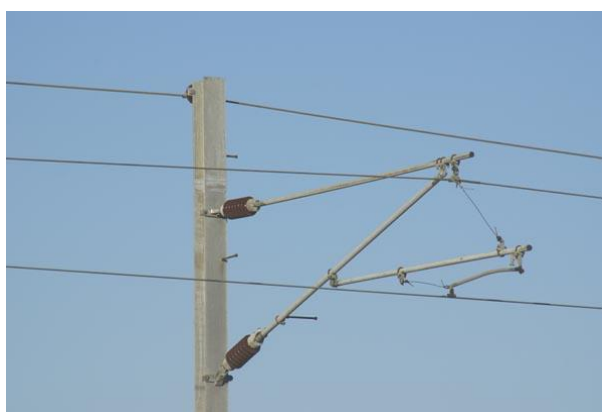


图 3.1 接触网腕臂用棒形绝缘子现场图片

仿真模型选用接触网 QBN-25 型号腕臂用棒形瓷绝缘子^[47]，其结构如图 3.2 所示。棒形绝缘子工作电压为工频单相交流电，其主要技术参数如表 3.1 所示。为了提高供电臂的供电电压水平，常常将牵引变电所牵引侧的空载母线电压最高调到 29kV，而接触

网的短时间可能出现的电压最小值为 17.5kV，所以接触网棒形绝缘子的承受电压范围是 17.5kV~29kV^[48]。为便于表述，定义从接触网棒形绝缘子低压端起第 1、2、…、9 个伞裙分别为 1、2、…、9 号伞。

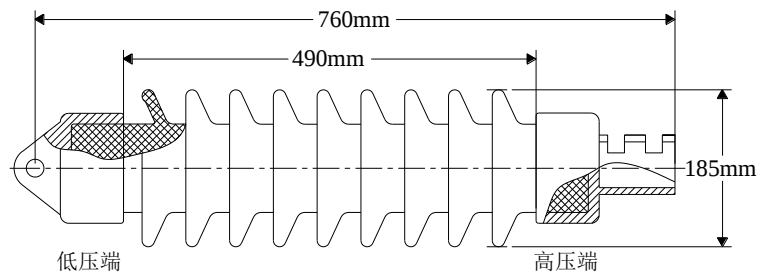


图 3.2 QBN-25 型绝缘子结构图

表 3.1 QBN-25 型绝缘子主要技术参数

项目	爬电距离 (mm)	工频耐受电压有效值	
		干 (kV)	湿 (kV)
参数	1200	160	130

根据绝缘子的工作环境，应用 CAD 软件 SolidWorks 绘制绝缘子的三维几何模型，将绘制的几何模型保存为.sldprt 或.sldasm 格式文件，导入到有限元软件 COMSOL Multiphysics 中。选择低频电磁场 AC/DC 模块中的静电场模式，模型中各媒质参数设置如表 3.2 所示。仿真中绝缘子高压端金具施加的电位为接触网最高网压的交流峰值 41kV($29\times\sqrt{2}\approx 41$)，低压端金具施加零电位。为了建立简化模型，模型忽略了绝缘子金具中的非轴对称部分。

表 3.2 电场计算模型的基本参数

物理媒质	相对介电常数
空气	1.006
电瓷	6
金属	10^{10}
沙粒	3.5

3. 1. 2 人工截断法的应用

绝缘子工作在无限延伸的空气区域中，相应的电场分布问题属于无限开区域问题的

求解，而利用有限元方法计算电场只能在一个有限的区域内进行，目前常用的解决方法是利用人工截断法对空气域人工设置截断边界^[38]。在二维电场求解中，截断区域一般选用半圆、四分之一圆或整圆。而对于三维电场的求解，截断区域一般选用球体或者圆柱体。如图 3.3 所示，将绝缘子模型外包围的空气域设置成与绝缘子同轴的圆柱体。因求解区域的大小，也就是截断区域大小既关系到电场求解的准确性，也关系到计算量的大小。考虑到剖分、计算工作量和计算精度之间应取一较合理的值，采用逐渐扩大求解区域大小的方法来确定求解范围。

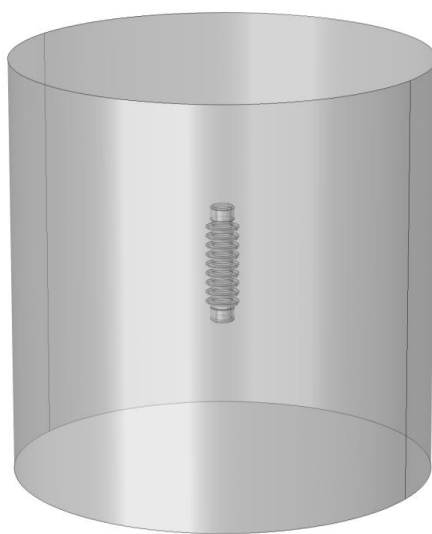


图 3.3 仿真模型软件截图

制定三种计算方案：方案一将包围绝缘子的圆柱体空气域的高与底面直径设为绝缘子长度的 1.5 倍，方案二设为绝缘子长度的 3 倍，方案三设为绝缘子长度的 5 倍。通过计算仿真模型中空气域的大小对绝缘子绝缘表面上最大场强的影响，来确定合理的空气域尺寸，如果这种影响十分微弱，就选择小尺寸的空气域。仿真计算三种尺寸下绝缘子绝缘表面上的最大场强(高压端爬距 1200mm 处)，结果如表 3.3 所示。计算结果表明，如果空气域圆柱体的高与底面直径设置为绝缘子长度的 3 倍以上，其尺寸的大小对绝缘子电场分布的影响是十分微弱的，故设置模型圆柱体空气域的高与底面直径均为绝缘子长度的 3 倍。

表 3.3 不同空气域尺寸下绝缘子沿面的最大场强

空气域尺寸	1.5 倍绝缘子长度	3 倍绝缘子长度	5 倍绝缘子长度
最大电场强度(V/m)	6.08×10^5	6.45×10^5	6.44×10^5

3.1.3 无限元区域的应用

在 COMSOL Multiphysics 有限元软件中具有对几何模型的指定区域设置为无限元区域的功能，无限元可将几何模型的局部区域延伸到更大的区域，从而可以更好地解决电场、磁场的远场耗散问题^[38,43,49]。

在原模型空气域人工截断的外边界上再增加一层扩展区域，且保证扩展区域的内部边界与原模型的外部边界连接，扩展区域如图 3.4 所示。设置新增加的扩展区域为空气的介电常数 1，并在软件中设置扩展区域为无限元。绝缘子电场分布的仿真模型采用人工截断边界和无限元区域的组合共同模拟仿真模型的无限远边界，使仿真结果更加趋于精确。

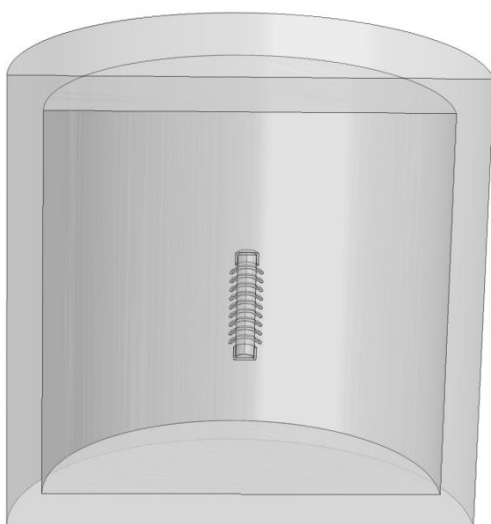


图 3.4 模型无限元区域软件截图（剖面图）

3.1.4 网格剖分

有限元法属于一种近似求解方法，网格剖分是有限元求解的重要过程，它将连续的求解域离散成有限个单元，通过单元的边界节点连接成组合体，以此来逼近求解域。增大网格的数量和减小网格的尺寸虽然可以提高计算精度，但同时也会大幅提高计算规模，延长求解时间。为了能够在合理的求解时间内得到较高精度的解，就要在单元和节点数目、求解时间与求解精度之间加以权衡和调整。

在计算机资源允许的前提下对仿真模型中的媒质分界面剖分了较为密集的网格，而对距离媒质分界面距离较远的空气域剖分的网格相对稀疏，从而可在有限的求解时间内保证了计算精度，网格剖分效果如图 3.5 所示。

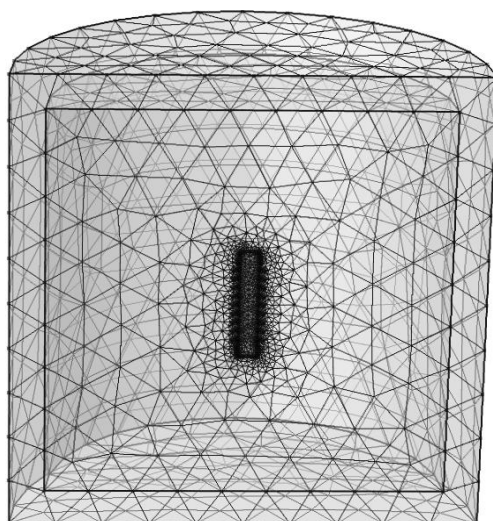


图 3.5 模型网格剖分软件截图（剖面图）

3.2 绝缘子电位分布

仿真模型进行网格剖分后便可以对绝缘子的电位和电场分布进行求解，分别利用二维绘图和一维绘图对求取的结果进行可视化处理。绝缘子的等位线分布如图 3.6 所示，靠近绝缘子两端金具区域的等位线密度较大，从而具有较高的电位梯度。

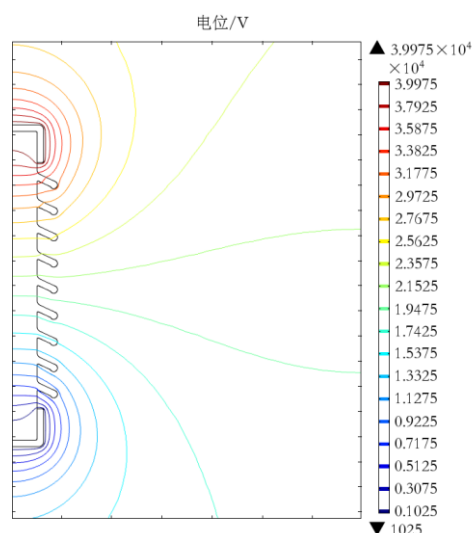


图 3.6 清洁环境下绝缘子等位线分布仿真截图

在绝缘子两端金具表面分布着电荷，根据静电学中点电荷在媒质中引起的电场强度公式

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \mathbf{e}_r \quad (3.1)$$

其中, q 为点电荷的电荷量, 单位是 C; r 为场点与点电荷的距离, 单位是 m; $\mathbf{e}_r$ 为源点指向场点的单位矢量。结合式 2.3, 得出绝缘子金具附近具有较高的电位梯度。

由于绝缘子高压端的电位高于绝缘子低压端的电位, 使得绝缘子沿面电位从低压端向高压端具有逐渐升高的总趋势, 沿面电位分布如图 3.7 所示。由于绝缘子几何形状的原因, 曲折的绝缘表面导致其沿面电位非单调上升, 局部电位有下降的趋势。绝缘子 1~9 号伞裙承受的电压占绝缘子工作电压的百分比分别为 25.17%、9.34%、7.41%、6.49%、6.28%、6.72%、7.96%、10.45%、20.17%。在绝缘子每个伞裙所占爬距和轴向距离相同的情况下, 绝缘子两端金具附近具有较高的电位梯度是导致靠近绝缘子两端的伞裙承担的电压较高, 而靠近绝缘子中间的伞裙承担的电压较低的重要原因。

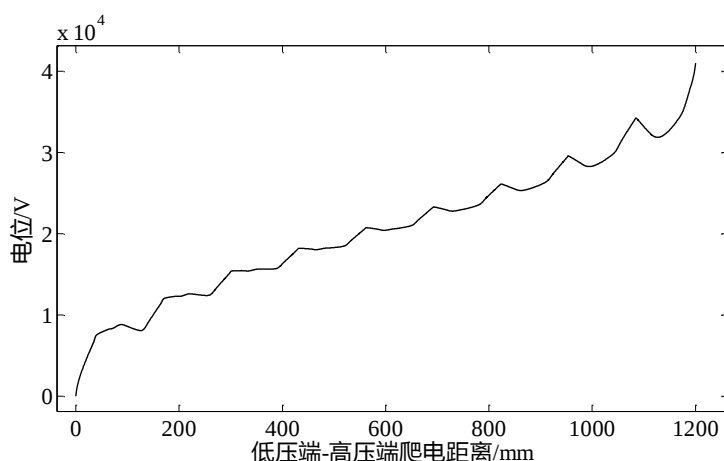


图 3.7 清洁环境下绝缘子沿面电位分布

3.3 绝缘子电场分布

由式 3.1 可知, 因为金具上分布电荷的原因, 距离金具较近的区域具有较高的电场强度。绝缘子的电场线大多数从高压端金具指向低压端金具, 高、低压端金具成为电场线重要的“源”与“汇”, 故金具附近具有较为密集的电场线, 同样说明了金具附近具有较高的电场强度, 仿真计算得出清洁环境下绝缘子的电场分布云图如图 3.8 所示。

为了更加直观地反映绝缘子的电场分布, 计算了绝缘子绝缘表面上的电场强度, 且计算的结果均为模值。如图 3.9 所示, 绝缘子沿面的电场强度两端高、中间低, 总体呈非对称“U”形分布。金具、空气和电瓷交界处具有绝缘子沿面较高的电场强度, 场强在低压端处达到了 $5.92 \times 10^5 \text{V/m}$, 而在高压端处达到沿面最高值 $6.44 \times 10^5 \text{V/m}$ 。对比图

3.7 与图 3.9 可见，绝缘子两端承受电压较高的伞裙表面同样具有较高的电场强度。

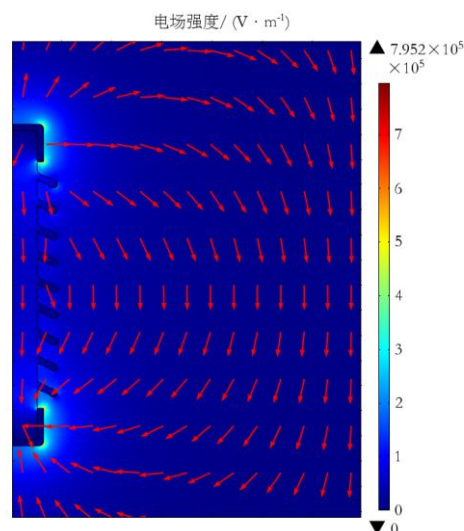


图 3.8 清洁环境下绝缘子电场分布仿真截图

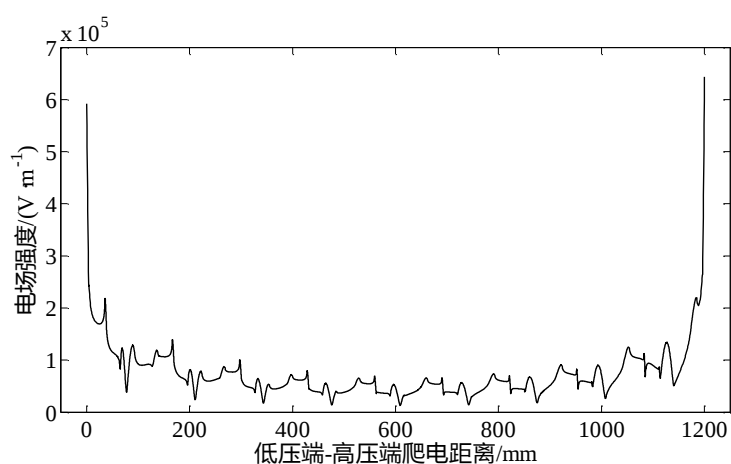


图 3.9 清洁环境下绝缘子沿面电场分布

3.4 绝缘子几何形状对沿面电位和电场的影响

绝缘子各伞裙对应的电位和场强曲线形状具有一定相似性，其中 3~7 号伞裙对应的电位和电场曲线形状相似度较高。图 3.10(a)~图 3.10(e)与图 3.11(a)~图 3.11(e)分别给出了绝缘子的 3~7 号伞裙所对应的电位和电场分布。由图 3.6 可知，在绝缘子中部的各条等位线近似平行，各等位线间距相似，从而导致了绝缘子中部各伞裙对应的电位曲线形状相似度较高。由图 3.8 可知，电场线从绝缘子的高压端金具指向低压端金具，绝缘子中部沿面的电场线疏密程度相似，从而导致绝缘子中部各伞裙对应了相似的场强曲线形

状，且幅值也具有相似性。

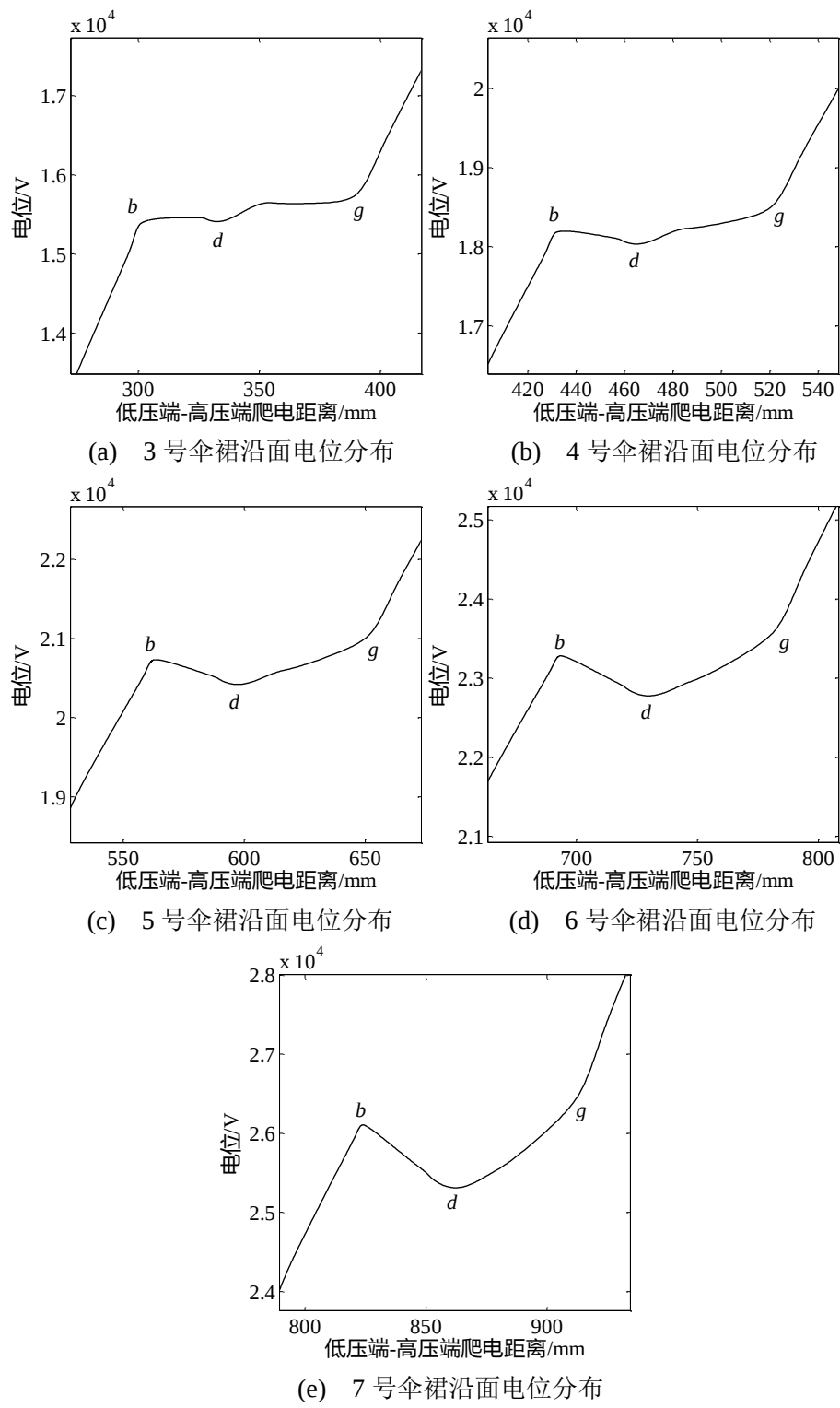


图 3.10 3~7 号伞裙沿面电位分布

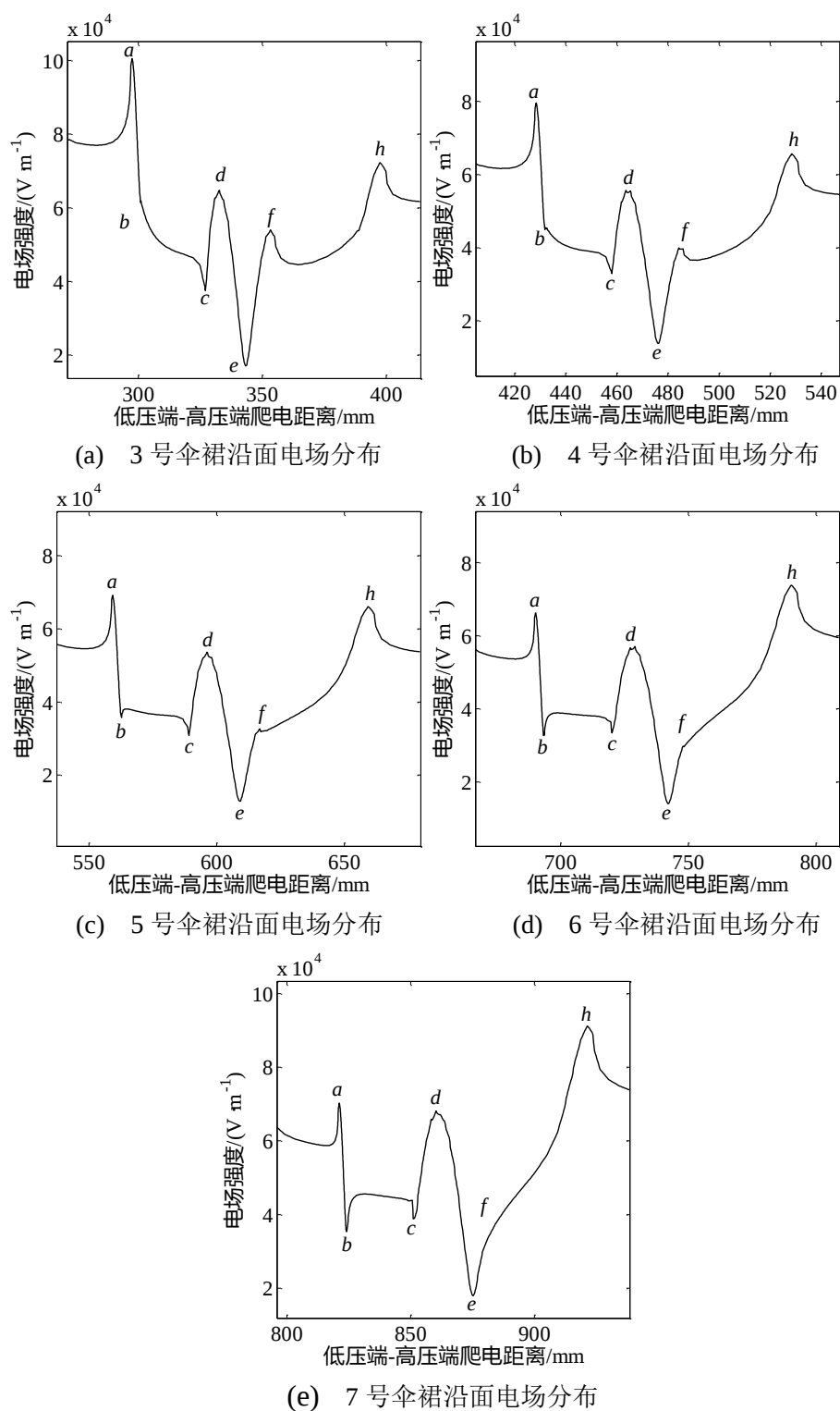


图 3.11 3~7 号伞裙沿面电场分布

如图 3.10 和图 3.11 所示，对绝缘子各伞裙的电位和场强曲线拐点按爬距依次标注。

以5号伞裙为例, $a \sim h$ 共8个电位和场强曲线拐点所对应的绝缘子伞裙表面位置如图3.12所示。可见, 绝缘子沿面电位和电场分布受绝缘子几何尺寸、伞裙形状的影响较为明显。

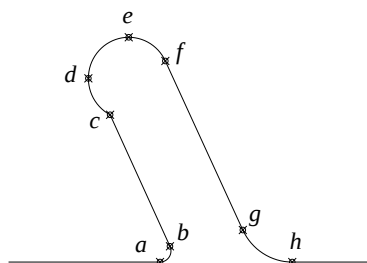


图 3.12 5 号伞裙表面位置点

3.5 计算方法的验证

验证计算方法及仿真流程正确性最直接的途径为现场仪器测量, 但目前较难实现在实验室模拟仿真中所涉及的沙尘环境, 并进行绝缘子沿面电位和电场的测量。

基于静电场有限元法对单片 XP-70 盘型悬式绝缘子的电位和电场分布进行了仿真计算, 并与文献[50]中 XP-70 盘型悬式绝缘子电场分布的测量数据进行了对比。误差满足工程需求, 分析原因主要由于仪器测量的是绝缘子表面上方几毫米的场强, 且仪器探头会畸变周围场强。通过对比证明了本文的建模方法、仿真流程和数据来源具有较好的准确性。

3.6 小结

作为与沙尘环境绝缘子电位和电场分布的对比基础, 计算了清洁环境下(绝缘子周围空气清洁、表面清洁、无外加电场)的沿面电位和电场分布情况。为使仿真结果更加精确, 采用了人工截断边界和无限元区域的组合共同模拟仿真模型的无限远边界。仿真表明, 绝缘子沿面电位从低压端至高压端逐渐升高, 电场强度总体呈非对称“U”形分布, 且绝缘子沿面电位和电场分布受绝缘子几何尺寸、伞裙形状的影响较为明显。

4 表面覆沙与沙尘电场作用时接触网绝缘子电场分布

4.1 绝缘子表面覆沙时绝缘子电场分布

沙尘加剧在绝缘子表面上的沉积是沙尘天气所导致的一个突出特点，文章分析了绝缘子表面沉积沙尘，沙层中出现无沙带时的电场分布。

4.1.1 沙层沉积于伞裙上表面

绝缘子伞裙上表面是沙尘沉积的重要位置，在绝缘子各伞裙上表面设置均匀厚度的沙层，覆沙效果如图 4.1 所示。

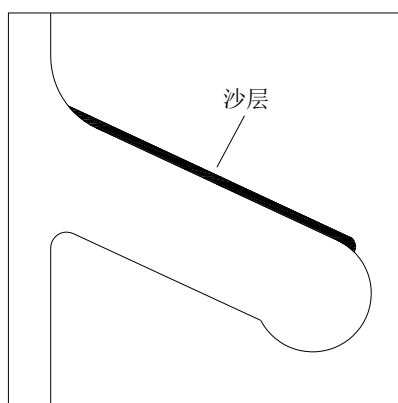


图 4.1 伞裙上表面覆沙示意图

计算绝缘子伞裙上表面附着沙层时绝缘子沿面的电场分布。如图 4.2 所示，沙层处的场强将会下降，且覆沙伞裙越靠近绝缘子的低压端，场强下降幅度越大。

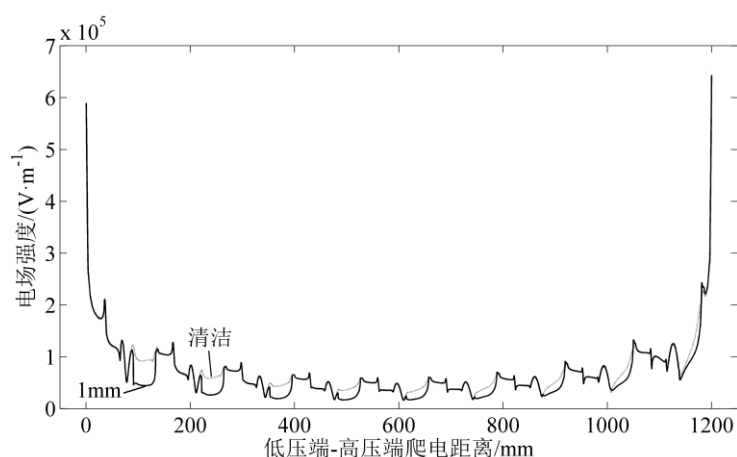


图 4.2 绝缘子伞裙上表面覆沙时电场分布

为计算不同覆沙厚度对场强下降幅度的影响，分别计算伞裙表面 1mm、2mm 覆沙厚度时绝缘子的沿面场强。仿真结果表明，覆沙厚度对场强下降幅度无明显影响，电场分布如图 4.3 所示。由于介电常数比较大的媒质在电场中极化作用比较强，而极化电荷的电场将使该处原有的电场减弱。绝缘子表面附着沙尘时，沙尘的相对介电常数 3.5 要高于空气的相对介电常数 1，进而绝缘子覆沙处的电场强度将会降低。

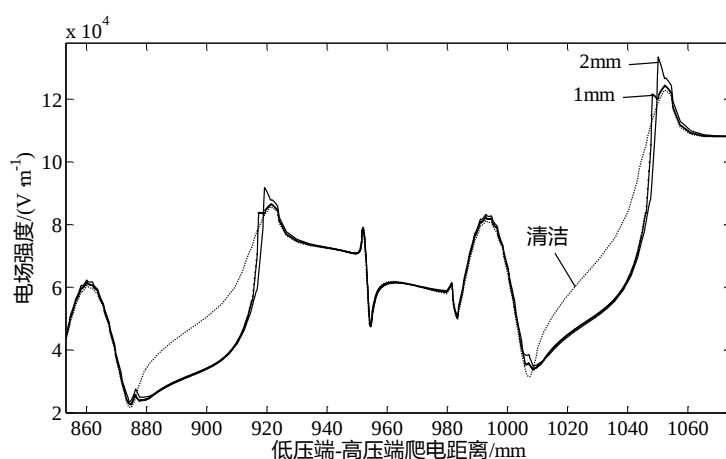


图 4.3 绝缘子表面沉积沙尘时的电场分布

4.1.2 沙层中出现环状无沙带

绝缘子表面沙层出现无沙带可以影响绝缘子的闪络特性^[16,17]。为模拟伞裙上表面沙层出现的无沙带，在伞裙上表面沙层中央设置一条环状无沙带，无沙带与绝缘子中心轴对称，且圆周方向宽度相等，如图 4.4 所示。

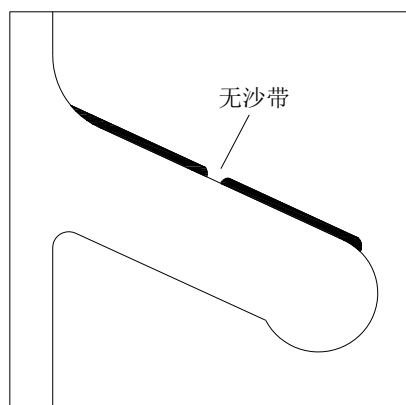


图 4.4 沙层中无沙带示意图

仿真分析无沙带及其伞裙位置对绝缘子沿面场强的影响，当沙层中出现无沙带后，

无沙带处场强将会升高,且无沙带所在伞裙越靠近绝缘子的高压端,场强升高幅度越大,绝缘子沿面场强如图 4.5 所示(标注“ $x\text{ mm}$, $y\text{ mm}$ ”表示在 $x\text{ mm}$ 厚的沙层上出现 $y\text{ mm}$ 宽的无沙带)。当 1 mm 厚沙层出现 1 mm 宽的无沙带时,7~9 号伞裙上无沙带处的场强高于清洁状态时此处的场强。其中,9 号伞裙上的无沙带处场强比清洁状态时场强高出 $1.62 \times 10^4 \text{ V/m}$ 。

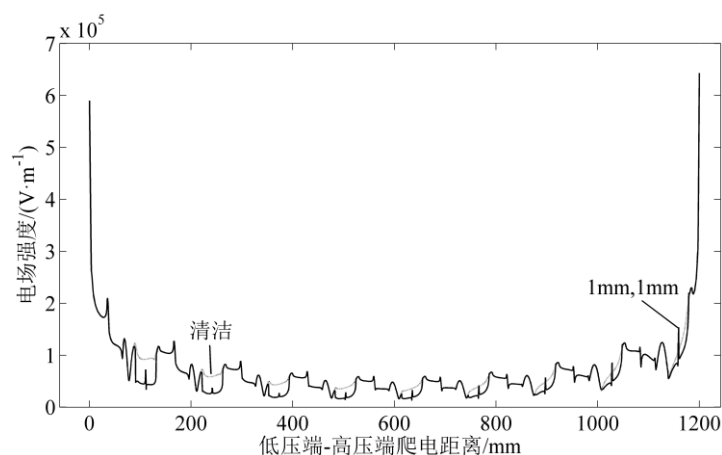


图 4.5 沙层中出现无沙带时的电场分布

仿真分析无沙带宽度和所在沙层厚度对绝缘子沿面场强的影响。当沙层厚度相同时,1~4 号伞裙的无沙带处场强随无沙带宽度减小而降低,5~9 号伞裙的无沙带处场强随无沙带宽度减小而升高。当无沙带宽度相同时,1~4 号伞裙的无沙带处场强随沙层加厚而降低,5~9 号伞裙的无沙带处场强随沙层加厚而升高。以 8 号伞裙为例,沿面场强分布如图 4.6 所示。

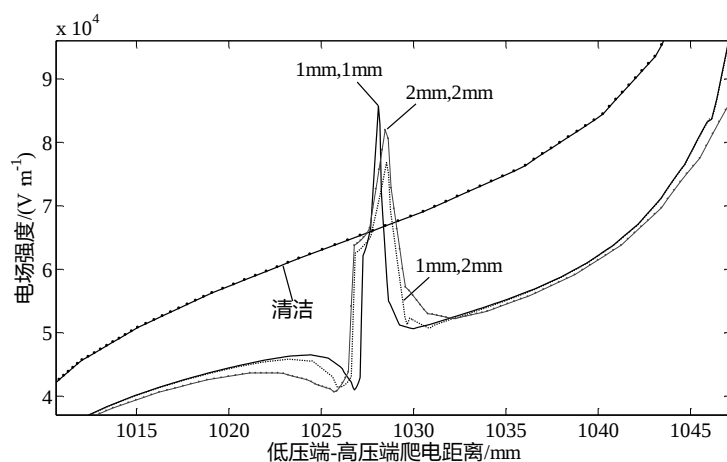


图 4.6 沙层厚度和无沙带宽度对绝缘子沿面电场分布的影响

当不同媒质处在同一电场中时，它们的电场强度与介电常数成反比，即

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{E_2}{E_1}$$

其中， ε_1 、 ε_2 、 E_1 、 E_2 分别为处在同一电场中的两种媒质的介电常数与媒质内的场强模值。因此，无沙带处的场强高于覆沙处沿面场强。由于模型中不同位置的场强大小和方向不同，电场线在通过两种不同媒质时折射效果不同，从而导致了各伞裙覆沙及无沙带沿面场强下降和升高的幅度不同。

仿真计算覆沙对绝缘子沿面电位分布的影响，如图 4.7 所示，绝缘子表面覆沙对绝缘子沿面电位影响十分微弱，与清洁环境下绝缘子沿面电位分布几乎重合。

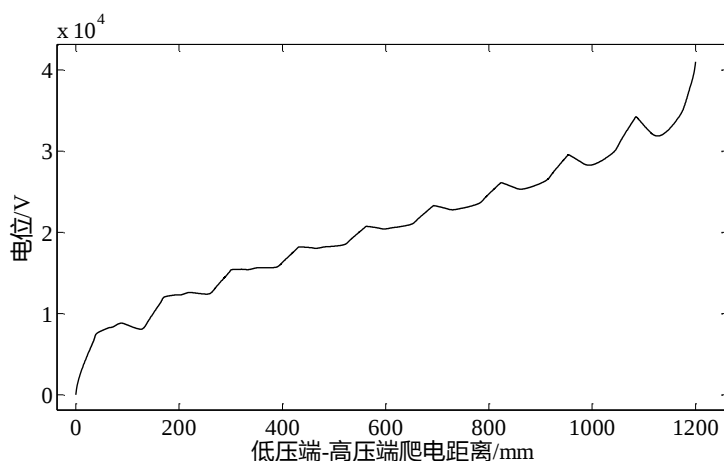


图 4.7 绝缘子表面覆沙时绝缘子沿面电位分布

4.2 沙尘电场作用时绝缘子电场分布

不同的沙尘天气会在空间中产生不同大小和方向的沙尘电场，进而可对绝缘子电场分布产生影响。本节分析了沙尘电场对水平及倾斜安装方式下的接触网腕臂用棒形绝缘子电场分布的影响。

4.2.1 沙尘电场数据的获取

中科院寒旱所张鸿发野外实地测量出沙尘天气距地面 1m、4m、8m、16m 高度上的电场强度^[32]，而设定接触网腕臂棒形绝缘子工作高度为 6.5m，处于四组离散数据之间，故适合采用一维数据插值的方法求取绝缘子工作高度上的沙尘电场。作为离散函数逼近的重要方法，利用插值可以根据函数在有限个离散点处的取值状况，估算得出函数在其他点处的近似值。插值方法可在离散数据的基础上补插连续函数，使得这条连续的函数

曲线通过全部给定的离散数据点，在原始数据点之间按照一定的关系插入新的数据点，以便更准确地分析数据的变化规律。利用 MATLAB 软件提供的 spline 三次样条插值函数进行绘制^[51,52]，差值计算的结果如表 4.1 所示，沙尘暴天气距地面 6.5m 高度会出现幅值较大的负电场，其方向竖直于大地向上。

表 4.1 插值计算沙尘电场强度结果

天 气	16m (kV/m)	8m (kV/m)	6.5m (kV/m)	4m (kV/m)	1m (kV/m)
浮 尘	0.956	5.229	4.542	2.756	0.832
扬 沙	-9.451	3.780	3.596	2.165	0.903
沙尘暴	-36.755	-6.899	-4.639	-2.571	-0.308

4.2.2 绝缘子电场分布特性

在沙尘电场作用下，为分析绝缘子不同圆周方向上的电场分布情况，选取绝缘子沿面三个圆周方向爬距上的场强进行对比。设置过绝缘子中心轴的竖直平面与绝缘子瓷体表面相交的上、下两条曲线分别为“上爬距”和“下爬距”，而设置过绝缘子中心轴且与同过中心轴的竖直平面相垂直的平面与绝缘子瓷体表面相交曲线为“中爬距”，绝缘子圆周方向爬距位置如图 4.8 所示。

首先利用 COMSOL Multiphysics 有限元软件，在直角坐标系中计算清洁环境下不同安装方式下的接触网绝缘子沿面电场分布，其中倾斜安装绝缘子设置与地面成 45° 夹角，设置 z 轴的正方向为垂直于大地向上。并对绝缘子原电场与不同沙尘天气的沙尘电场进行矢量叠加计算，求得绝缘子沿面电场强度。不同沙尘天气下的绝缘子沿面电场强度模值的求取公式如下所示：

(1) 沙尘暴天气附加电场下绝缘子沿面电场强度 E_1

$$E_1 = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + (E_z + 4639)^2}$$

其中， E_x 、 E_y 、 E_z 分别为直角坐标系中清洁环境绝缘子的场强在 x、y、z 轴上的分量。

(2) 浮尘天气附加电场下绝缘子沿面电场强度 E_2

$$E_2 = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + (E_z - 4542)^2}$$

(3) 扬沙天气附加电场下绝缘子沿面电场强度 E_3

$$E_3 = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + (E_z - 3596)^2}$$

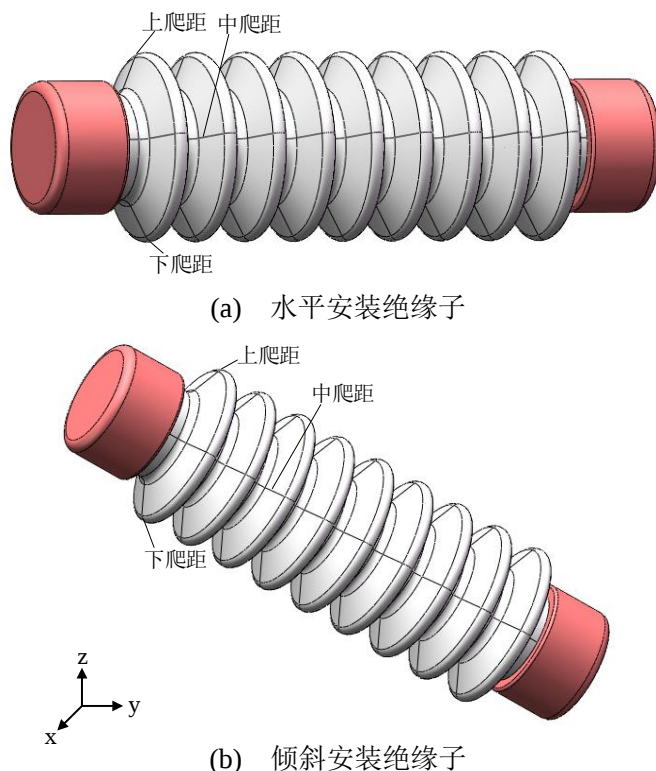
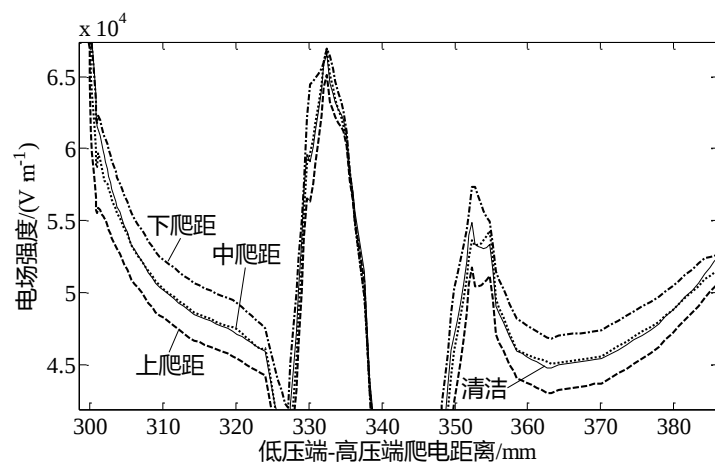


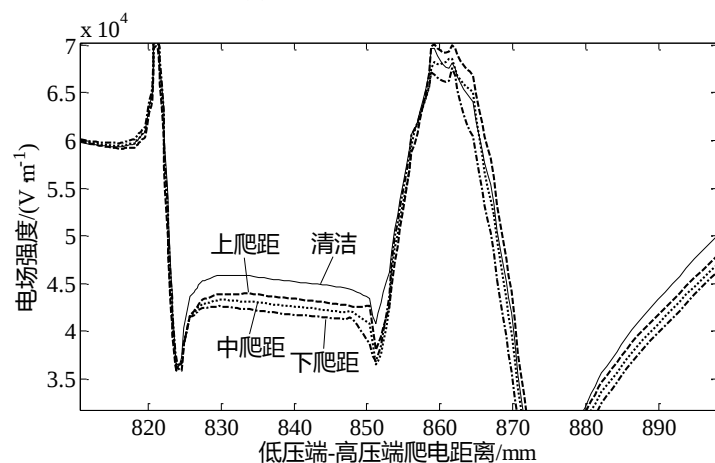
图 4.8 绝缘子周向爬距示意图

(1) 计算在沙尘暴天气的负电场作用下，绝缘子低压端附近周向场强的高低顺序为：下爬距>中爬距>上爬距，场强如图 4.9(a)、图 4.10(a)所示；而在绝缘子高压端附近周向场强的高低顺序为：上爬距>中爬距>下爬距，场强如图 4.9(b)、图 4.10(b)所示。在浮尘、扬沙天气的正电场作用下，缘子低压端附近周向场强的高低顺序为：上爬距>中爬距>下爬距，场强如图 4.11(a)、图 4.12(a)所示；而在绝缘子高压端附近周向场强的高低顺序为：下爬距>中爬距>上爬距，场强如图 4.11(b)、图 4.12(b)所示。

(2) 水平安装绝缘子低压端附近，在沙尘天气暴负电场作用下，下爬距场强上升，而上爬距场强下降，在浮尘、扬沙天气正电场作用下，情况相反，场强如图 4.9(a)、图 4.11(a)和图 4.13(a)所示；水平安装绝缘子高压端附近，在沙尘天气电场作用下，绝缘子沿面场强下降，场强如图 4.9(b)、图 4.11(b)和图 4.13(b)所示。倾斜安装绝缘子在沙尘暴天气的负电场作用下，绝缘子沿面的场强降低，场强如图 4.10(a)、图 4.10(b)所示；而在浮尘、扬沙天气的正电场作用下，绝缘子沿面上的场强升高，场强如图 4.12(a)、图 4.12(b)和图 4.14(a)、图 4.14 (b)所示。

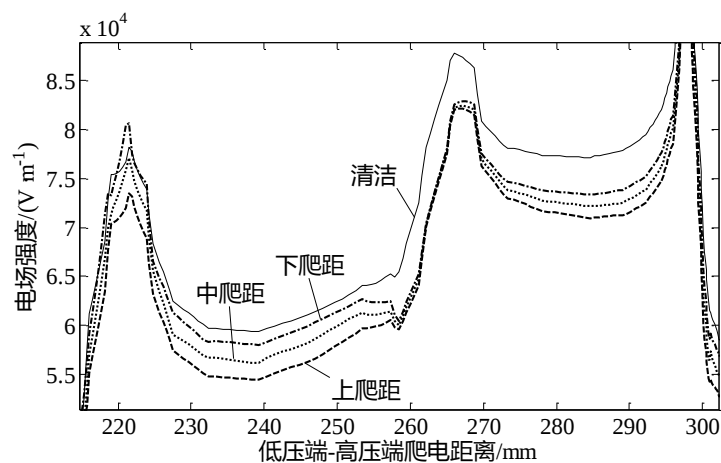


(a) 低压端附近场强



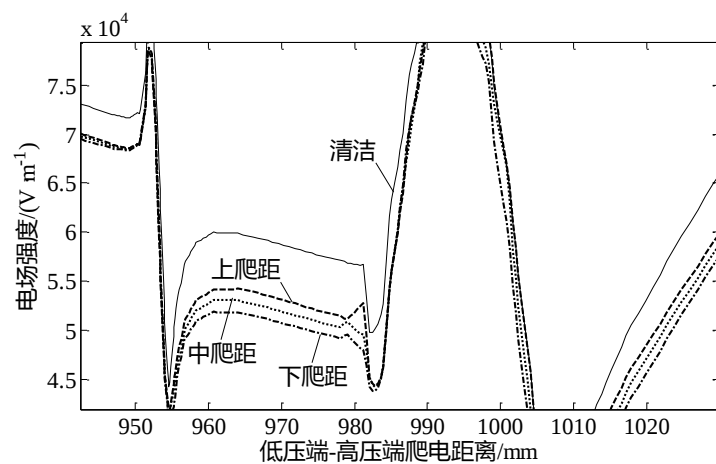
(b) 高压端附近场强

图 4.9 沙尘暴天气附加电场下水平安装绝缘子沿面电场分布



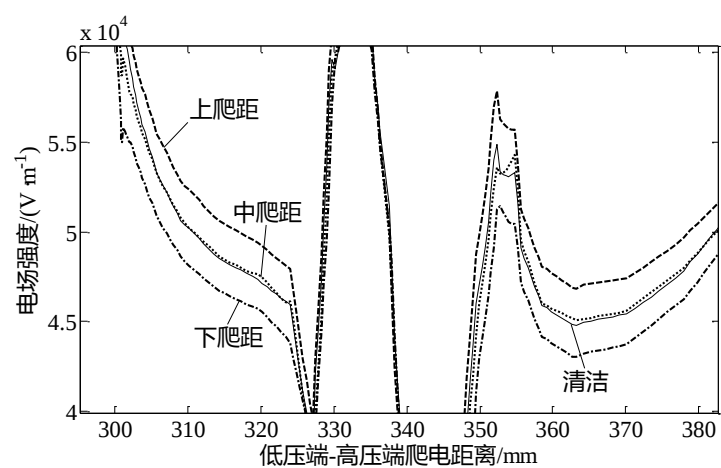
(a) 低压端附近场强

图 4.10 沙尘暴天气附加电场下倾斜安装绝缘子沿面电场分布

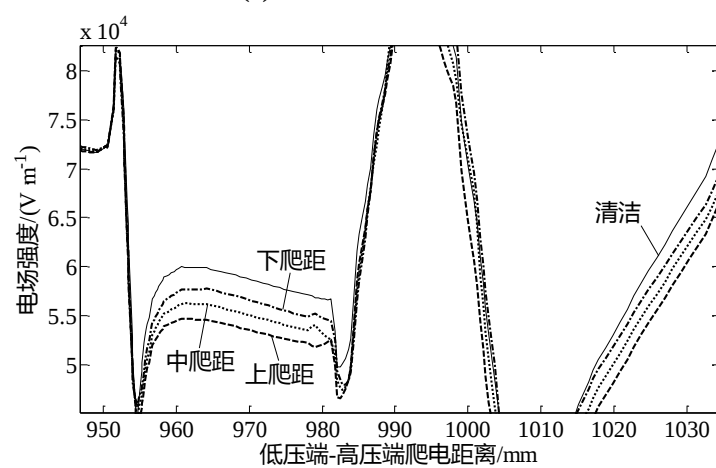


(b) 高压端附近场强

图 4.10 沙尘暴天气附加电场下倾斜安装绝缘子沿面电场分布

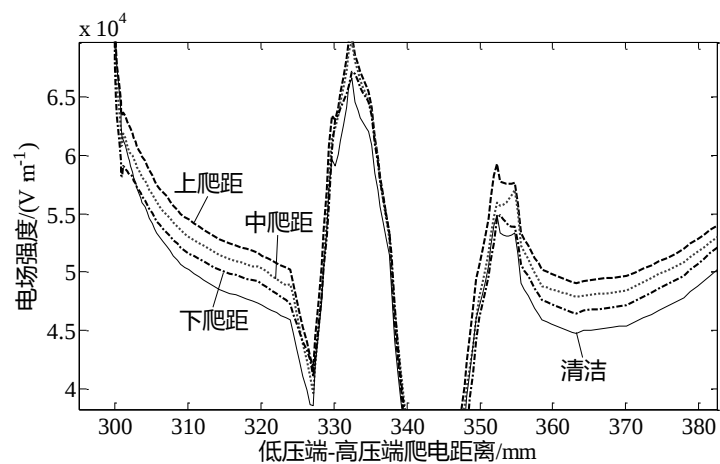


(a) 低压端附近场强

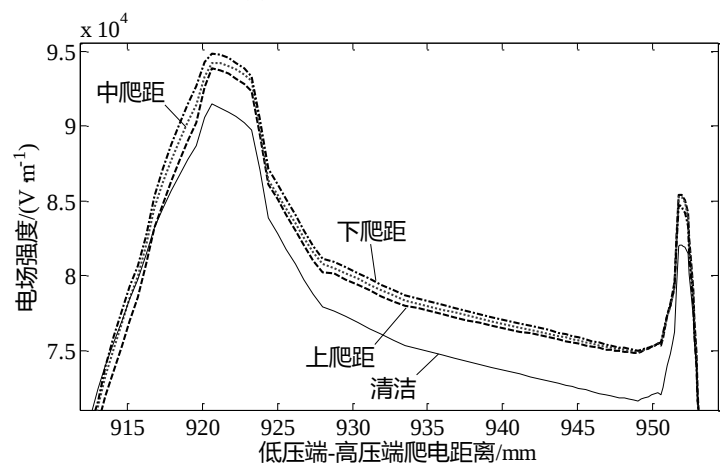


(b) 高压端附近场强

图 4.11 浮尘天气附加电场下水平安装绝缘子沿面电场分布

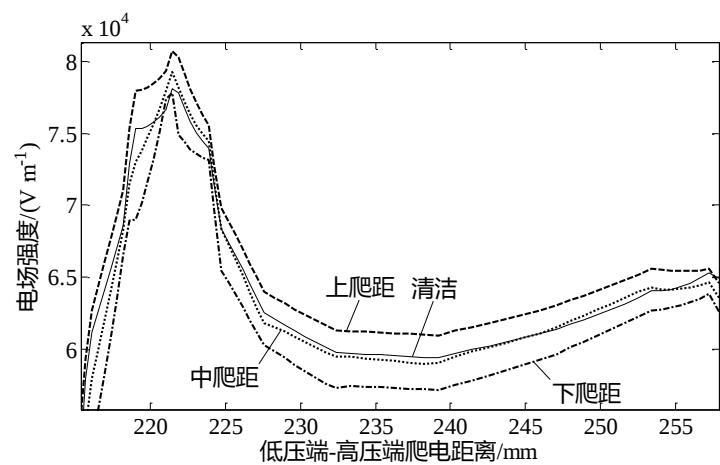


(a) 低压端附近场强



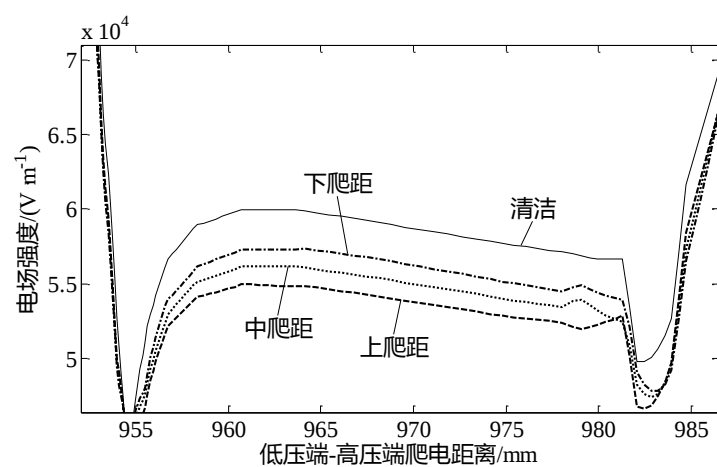
(b) 高压端附近场强

图 4.12 浮尘天气附加电场下倾斜安装绝缘子沿面电场分布



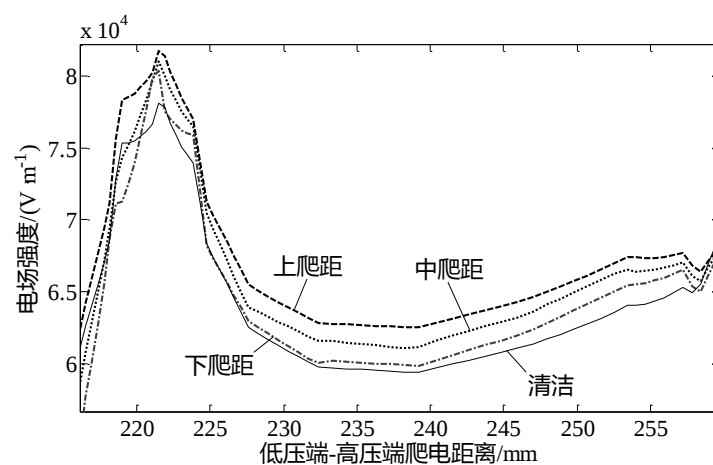
(a) 低压端附近场强

图 4.13 扬沙天气附加电场下水平安装绝缘子沿面电场分布

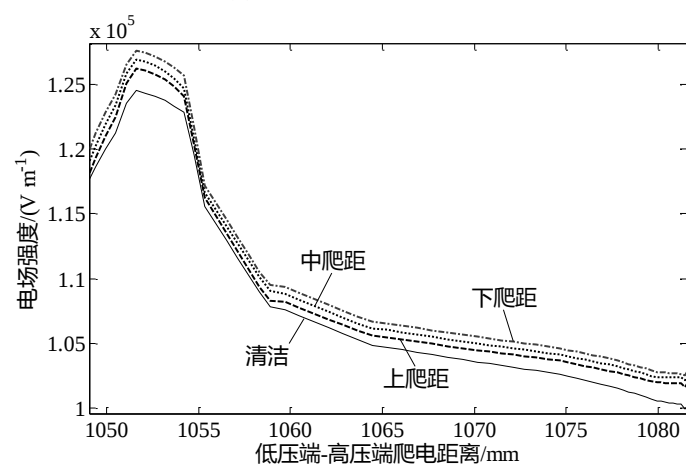


(b) 高压端附近场强

图 4.13 扬沙天气附加电场下水平安装绝缘子沿面电场分布



(a) 低压端附近场强



(b) 高压端附近场强

图 4.14 扬沙天气附加电场下倾斜安装绝缘子沿面电场分布

沙尘天气附加电场作用下绝缘子沿面电场分布是沙尘电场与绝缘子原始电场进行矢量叠加的结果。绝缘子圆周方向上的原始场强幅值相同但方向不同，在沙尘天气不同大小和方向附加电场的作用下，绝缘子周向场强的幅值和方向均发生了变化。可以推断，将要发生闪络时，电场强度高的圆周方向容易成电弧发展的通道。

以倾斜安装的绝缘子为例，因为绝缘子沿面电场的 z 轴分量几乎均为负值，所以在沙尘暴天气垂直于大地向上的电场作用下，会使原电场的 z 轴分量幅值减小，从而绝缘子沿面场强下降。而在浮尘、扬沙天气垂直于大地向下的电场作用下，原电场的 z 轴分量幅值增加，绝缘子沿面电场升高。因采用在软件后处理模块中用电场矢量叠加方法得到绝缘子沿面电场分布，本节并没有分析沙尘电场作用下的绝缘子沿面电位分布特性。

4.3 小结

绝缘子伞裙上表面覆沙时，沙层处的场强将会下降，当沙层中出现无沙带时，无沙带处的场强将会升高。沙尘电场会使绝缘子圆周方向的电场发生改变。水平安装绝缘子低压端附近，在沙尘暴天气负电场作用下，下爬距场强上升，而上爬距场强下降，在浮尘、扬沙天气正电场作用下，情况相反；水平安装绝缘子高压端附近，在沙尘天气电场作用下，绝缘子沿面场强下降。而对于倾斜安装绝缘子，在沙尘暴天气的负电场作用下，绝缘子沿面场强降低，在浮尘、扬沙天气的正电场作用下，绝缘子沿面场强升高。

5 悬浮沙粒时接触网绝缘子电场分布

空气中弥漫的沙尘是沙尘天气最突出的特点之一，悬浮沙粒使绝缘子周围的清洁空气变成了空气和沙粒的两项混合媒质，加之沙粒可能带上电荷，将严重影响接触网绝缘子的安全运行。本章分析了悬浮沙粒对接触网绝缘子沿面电位和电场分布的影响。

5.1 三维仿真模型的简化

仿真中采用了在几何模型的空气域中均匀设置小球体的方法，以模拟空气中的悬浮沙粒，并设置小球体的相对介电常数与沙粒的介电常数相同。经计算，距离绝缘子较远的悬浮沙粒对绝缘子的电位和电场分布的影响十分微弱，故忽略模型空气域外的悬浮沙粒对绝缘子的影响，为解决模型空气域中悬浮沙粒数量巨大，普通计算机硬件资源有限，无法对沙尘环境下绝缘子电位和电场进行仿真计算的问题，根据模型的轴对称特性和网格剖分的可操作性，过圆柱体模型的中心轴以 2° 圆心角的扇形柱体代替完整圆柱体模型。简化后的模型体积只有原模型的 $1/180$ ，从而大幅降低了计算规模，节约了仿真时间，仿真效率得到了很大的提高，简化模型如图 5.1 所示。

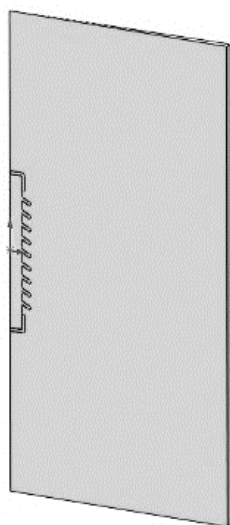


图 5.1 简化仿真模型软件截图

空气中沙粒之间或沙粒与大地之间的非对称摩擦会使沙粒带上电荷，带上电荷的沙粒会对高压设备产生较大的影响。学者 Schmidt 通过实验测量得出空气中沙粒所带正、负电量的最大荷质比分别为 $1.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ 、 $-3.04 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ ^[30]。为分析沙粒带电量的大小和极性对绝缘子电位和电场分布的影响，仿真中设置五种沙粒荷质比： 0C/kg 、

$1.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ 、 $3.04 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ 、 $-1.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ 、 $-3.04 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ (在后图分别标注为“电量 0”至“电量 4”)。为模拟我国西北沙尘暴的重要沙源地—宁夏沙坡头地区的沙粒粒径(范围为 $0.1 \text{ mm} \sim 0.315 \text{ mm}$ ^[28])，仿真中设置 0.1 mm 、 0.315 mm 两种直径的球体(分别标注为“粒径 1”、“粒径 2”)。在空气域中设定两种沙粒数量(标注为“数量 1”、“数量 2”，且“数量 1”为“数量 2”的一半)，以分析不同沙粒粒径和数量对绝缘子沿面电位和电场分布的影响。同一悬浮沙粒环境中，设置每个悬浮沙粒的大小相等，沙粒间距均匀。

仿真中分别设置三种不同带电特性的悬浮沙粒环境：

- (1) 电中性沙粒环境：设置每个沙粒均为电中性；
- (2) 相同带电量沙粒环境：对每个沙粒均设置相同的非零带电量；
- (3) 混合粒子群环境：

① 带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群：在所有悬浮沙粒中，对一半沙粒均设置相同的带电量，其余沙粒设置为电中性。如标注“粒径 2 数量 2 电量 1*”为在“数量 2”个沙粒中有一半(“数量 1”个)沙粒的荷质比均为 $1.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ ，其余沙粒为电中性。

② 正负极性沙粒混合粒子群：在全部沙粒中对一半沙粒均设置相同的正电量，其余沙粒均设置极性相反的负电量。如标注“粒径 2 数量 2 电量 1&3”为在“数量 2”个沙粒中有一半沙粒荷质比均为 $1.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ ，其余沙粒荷质比均为 $-1.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$ 。混合粒子群中不同带电特性的沙粒均匀分布。

5.2 绝缘子电位分布

(1) 计算空气中悬浮的电中性沙粒对绝缘子沿面电位的影响。如图 5.2 所示，空气中悬浮的电中性沙粒会小幅畸变绝缘子沿面电位。

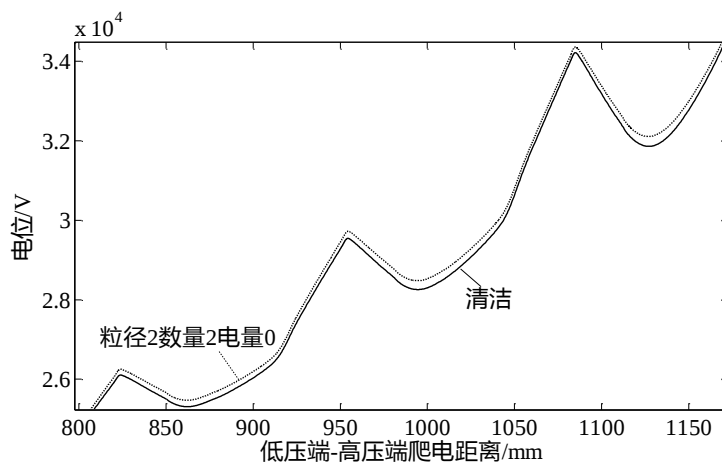


图 5.2 电中性悬浮沙粒对绝缘子沿面电位分布的影响

(2) 计算空气中悬浮沙粒全部带上相同电量后对绝缘子沿面电位的影响。

① 沙粒带正电量的情况下，当悬浮沙粒粒径和数量相同，绝缘子沿面电位随悬浮沙粒带电量的增加而升高，电位分布如图 5.3 所示。当悬浮沙粒的数量和带电量相同时，绝缘子沿面电位随沙粒粒径的增大而升高；当悬浮沙粒的粒径和带电量相同时，绝缘子沿面电位随沙粒的数量的增加而升高，电位分布如图 5.4 所示。因此，悬浮沙粒均带正电量时，绝缘子沿面电位随沙粒数量、粒径和荷质比的增加而升高。

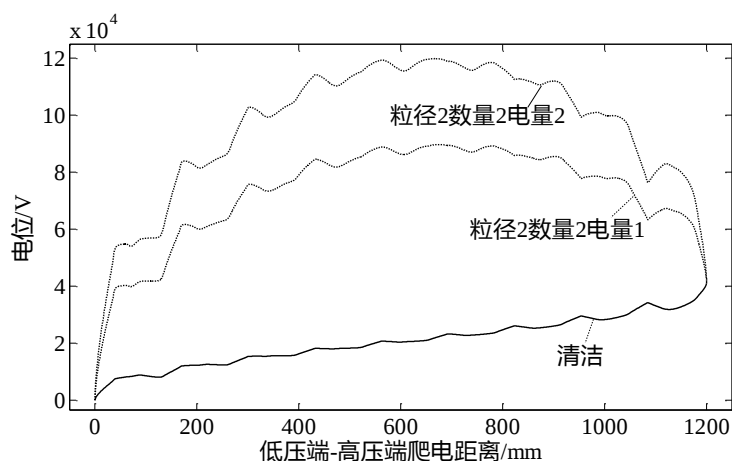


图 5.3 不同荷质比大小的正极性悬浮沙粒对绝缘子沿面电位分布的影响

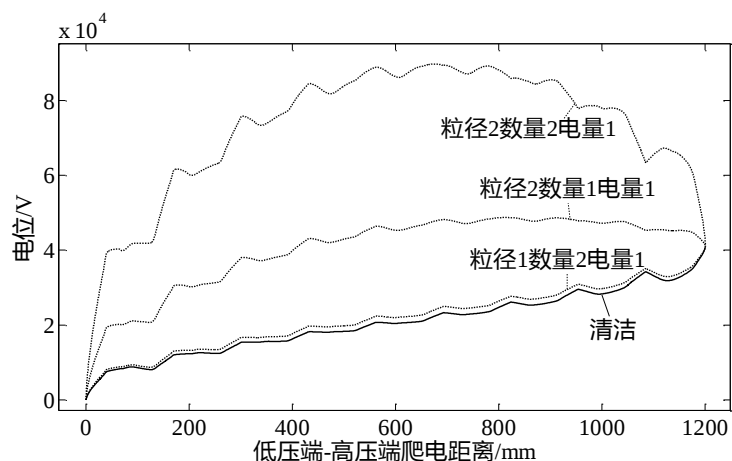


图 5.4 不同粒径和数量的正极性悬浮沙粒对绝缘子沿面电位分布的影响

② 当沙粒带负电量的情况下，当悬浮沙粒粒径和数量相同，绝缘子沿面电位随悬浮沙粒带电量绝对值的增加而降低，电位分布如图 5.5 所示。当悬浮沙粒的数量和带电量相同时，绝缘子沿面电位随沙粒粒径的增大而降低；当悬浮沙粒的粒径和带电量相同时，绝缘子沿面电位随沙粒的数量的增加而降低，电位分布如图 5.6 所示。因此，悬浮

沙粒均带负电量时，绝缘子沿面电位随沙粒数量、粒径和带电量的绝对值的增加而降低。

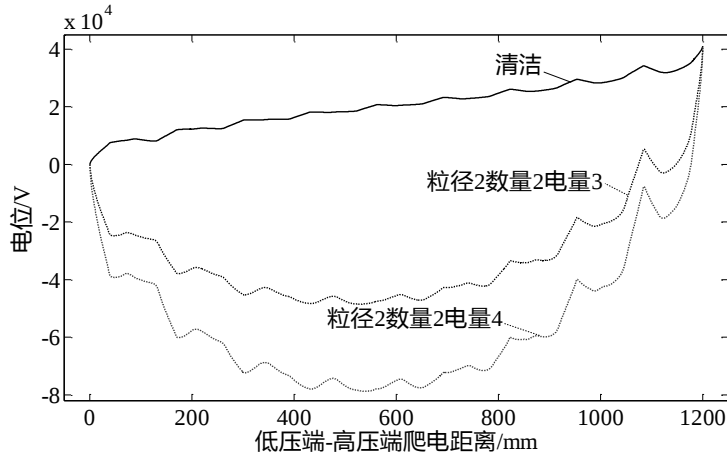


图 5.5 不同荷质比大小的负极性悬浮沙粒对绝缘子沿面电位分布的影响

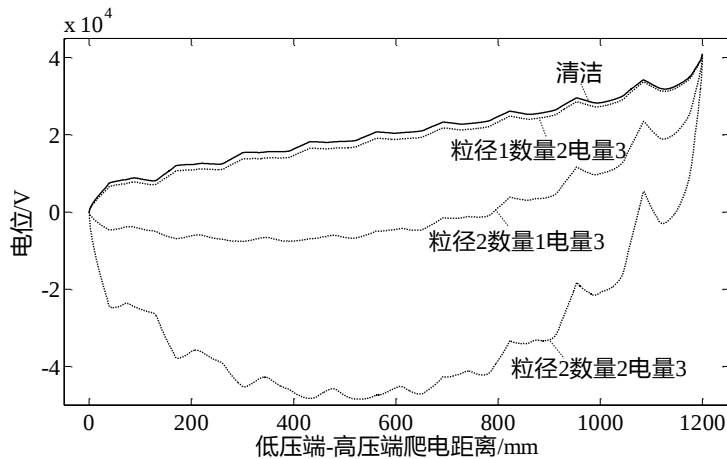


图 5.6 不同粒径和数量的负极性悬浮沙粒对绝缘子沿面电位分布的影响

③ 由图 5.3~图 5.6 可知，沙粒数量、粒径和荷质比的组合值如达到一定范围，当沙粒带正电量时，绝缘子沿面电位的最大值将超过绝缘子高压端金具的电位；而当沙粒带负电量时，绝缘子沿面电位的最小值将低于绝缘子低压端金具的电位(0V)。当处于“粒径 2 数量 2 电量 2”时，绝缘子沿面电位在距低压端 667mm 处达到最大值 119887V，绝缘子 1~9 号伞裙承受的电压占绝缘子工作电压的百分比分别为 178.56%、56.98%、33.23%、18.82%、4.54%、10.84%、28.17%、48.20%、104.72%。而当处于“粒径 2 数量 2 电量 4”时，绝缘子沿面电位在距低压端 541.5mm 处达到最小值-78721V，绝缘子 1~9 号伞裙承受的电压占绝缘子工作电压的百分比分别为 129.10%、38.25%、18.74%、5.10%、9.47%、26.01%、45.35%、69.05%、143.69%。带电沙粒使得绝缘子沿面电位升

高或降低的幅度越大，靠近绝缘子两端的伞裙承受的电压比例越高，而靠近绝缘子中间的伞裙承受的电压比例越低，总体上绝缘子各伞裙承受的电压会更不均匀。

(3) 带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电位的畸变幅度略大于混合粒子群中带电沙粒单独对绝缘子沿面电位的畸变幅度，而小于粒子群中全部沙粒带上相同电量时对绝缘子沿面电位的畸变幅度，电位分布如图 5.7 所示。悬浮正负极性沙粒混合粒子群时，绝缘子沿面电位只发生小幅畸变，相似于电中性沙粒对绝缘子电位的畸变。

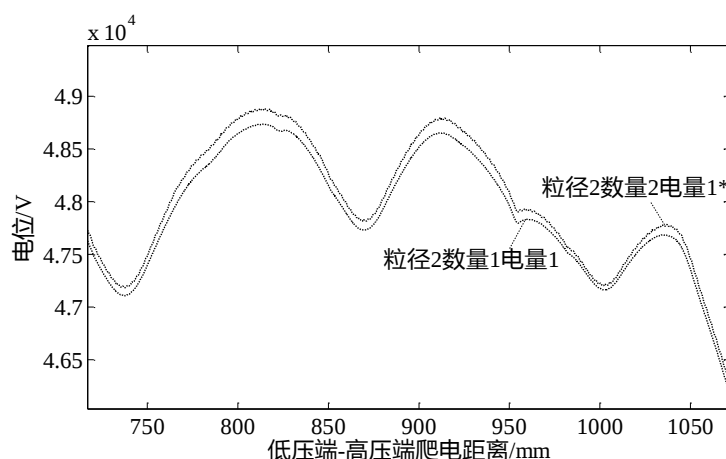


图 5.7 带电沙粒和电中性沙粒混合粒子群对绝缘子沿面电位分布的影响

5.3 绝缘子电场分布

(1) 计算空气中悬浮的电中性沙粒对绝缘子沿面电场的影响。如图 5.8 所示，电中性沙粒会小幅畸变绝缘子沿面电场，且畸变幅度随沙粒数量和粒径增大而加大。

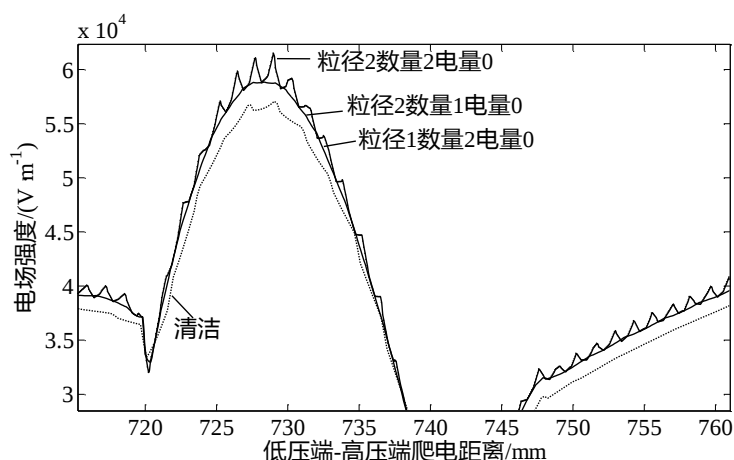


图 5.8 电中性悬浮沙粒对绝缘子沿面电场分布的影响

(2) 计算悬浮沙粒全部带上相同的电量后对绝缘子沿面电场的影响。在沙粒的带电量相同的情况下,当悬浮沙粒的数量相同时,悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度随沙粒粒径的增大而增大;当悬浮沙粒的粒径相同时,悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度随沙粒数量的增大而增大,电场分布如图 5.9 所示。当悬浮沙粒的数量、粒径相同时,悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度随沙粒带电量绝对值的增大而增大,电场分布如图 5.10 所示。因此,绝缘子沿面电场的畸变幅度随沙粒数量、粒径和荷质比绝对值的增大而加大。当处于“粒径 2 数量 2 电量 1”时,绝缘子沿面场强在低压端处达到最高值 $7.85 \times 10^6 \text{V/m}$ 。

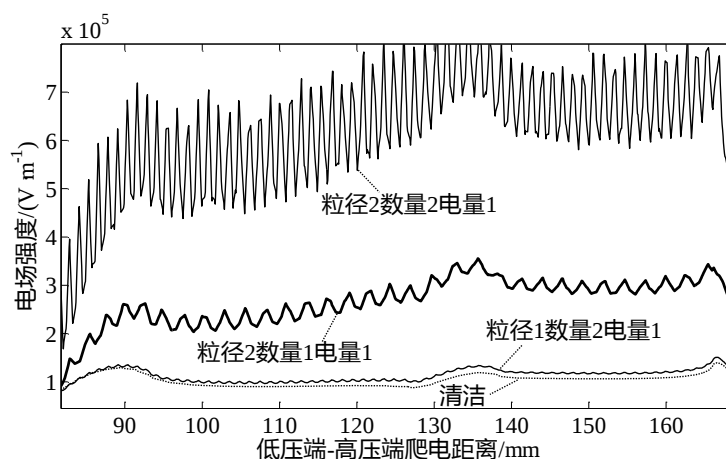


图 5.9 不同粒径和数量的同带电量悬浮沙粒对绝缘子沿面电场分布的影响

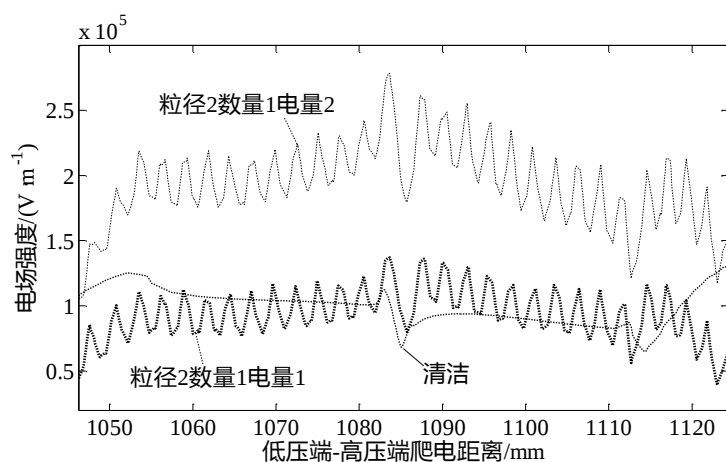
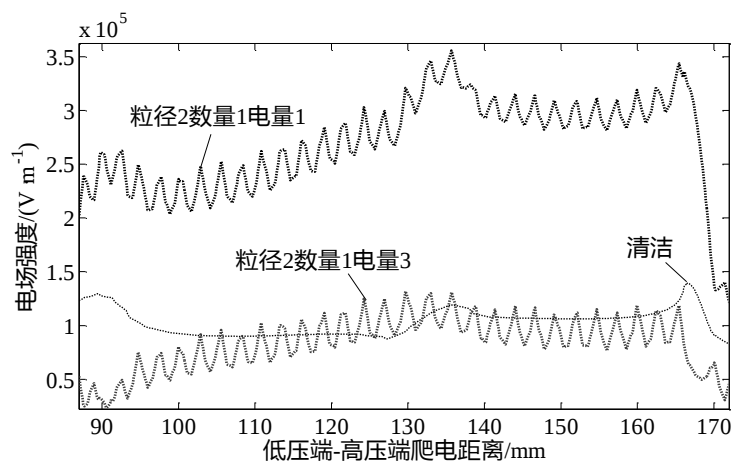


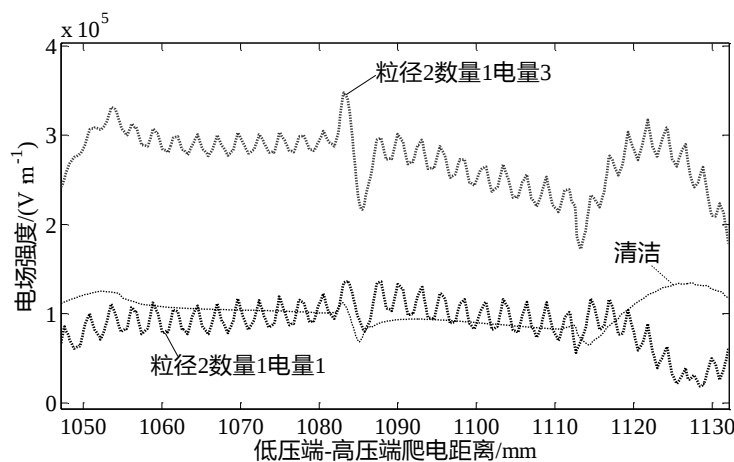
图 5.10 不同荷质比大小的同极性悬浮沙粒对绝缘子沿面电场分布的影响

当悬浮沙粒数量、粒径、沙粒荷质比绝对值相同时,极性相反的悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度在绝缘子低压端或高压端附近有着不同的特点。在绝缘子低压端附

近，带正电量的悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度大于带负电量的悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度，电场分布如图 5.11(a)所示；而在绝缘子高压端附近，带正电量的悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度小于带负电量的悬浮沙粒对绝缘子沿面场强的畸变幅度，电场分布如图 5.11(b)所示。



(a) 低压端附近电场分布



(b) 高压端附近电场分布

图 5.11 不同极性的悬浮沙粒对绝缘子沿面电场分布的影响

(3) 空气中悬浮带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电场的畸变幅度大于混合粒子群中带电沙粒单独对绝缘子沿面电场的畸变幅度，而小于粒子群中全部沙粒带上相同电量时对绝缘子沿面电场的畸变幅度，电场分布如图 5.12 所示。

正负极性沙粒混合粒子群对绝缘子沿面电场的畸变幅度小于混合粒子群中所有沙粒带上相同电量时对绝缘子沿面电场的畸变幅度，而介于粒子群中的正或负极性沙粒单独对绝缘子沿面电场的畸变幅度，电场分布如图 5.13 所示。

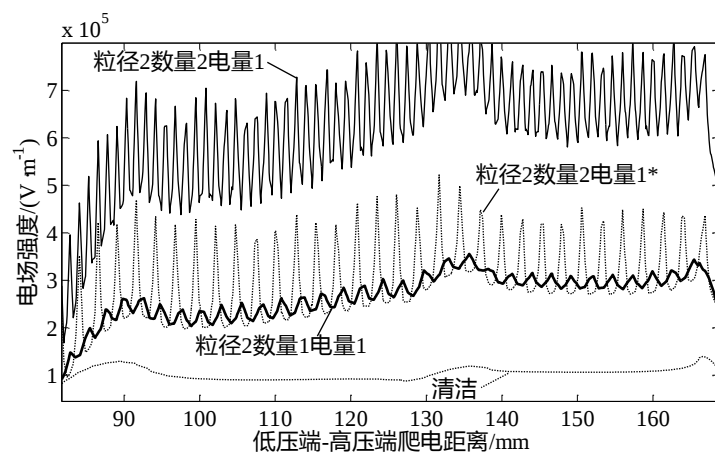


图 5.12 带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电场分布的影响

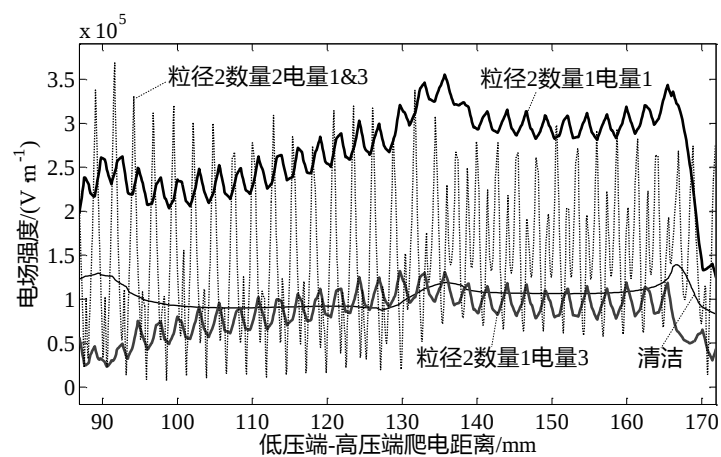


图 5.13 正负极性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电场分布的影响

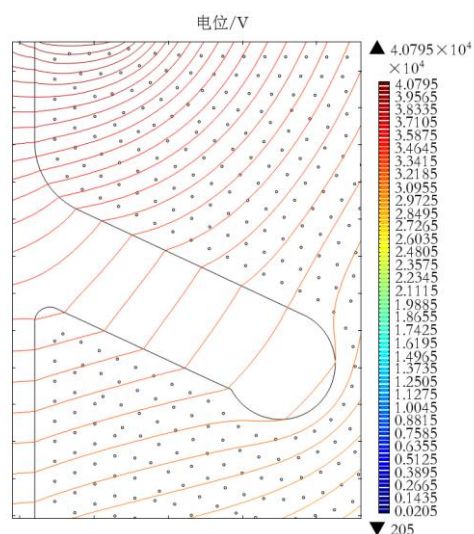


图 5.14 悬浮电中性沙粒时绝缘子等位线分布仿真截图

当悬浮电中性沙粒时，在绝缘子周围空气和沙粒的混合媒质环境中，由于空气与沙粒介电常数的差异，等位线及电场线穿过沙粒时会产生一定的偏移，从而造成绝缘子沿面电位和电场的小幅畸变，绝缘子等位线分布与电场分布如图 5.14、图 5.15 所示。

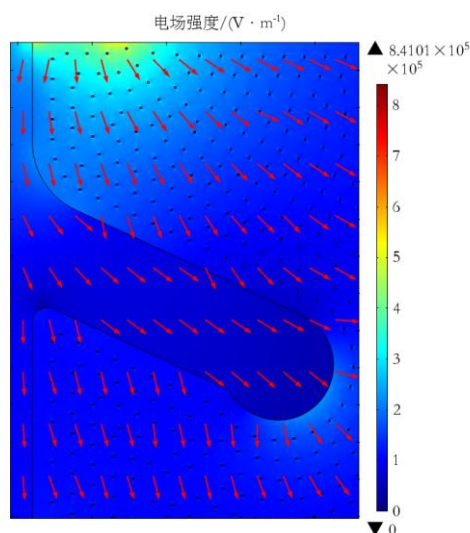


图 5.15 悬浮电中性沙粒时绝缘子电场分布仿真截图

当悬浮沙粒带上电荷后，沙粒的电场与绝缘子原有电场产生了叠加，叠加后空间内电位、电场大小及方向均发生一定的改变，且因沙粒数量、粒径、带电量大小和极性的不同而不同，进而引起了绝缘子沿面电位与电场的变化，绝缘子等位线分布与电场分布如图 5.16、图 5.17 所示（图中沙粒带正电荷）。悬浮沙粒具有相同的荷质比的情况下，当沙粒的粒径或数量增大时，全部悬浮沙粒所带的电荷总量增大，因而对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度增大，悬浮沙粒携带电荷是绝缘子沿面电位和电场畸变的重要原因。

带电沙粒附近具有较高的电场强度，悬浮沙粒与绝缘子表面距离很小，悬浮沙粒电场与绝缘子原电场进行叠加时，会使绝缘子沿面场强大幅畸变。绝缘子场强在不同沿面位置有着不同的幅值与方向，也使得悬浮沙粒在绝缘子不同的位置对绝缘子沿面场强畸变的幅度不同。

带正电荷的沙粒发出电场线，且表面具有较高的正电位，虽然电位从沙粒表面向外逐渐降低，但悬浮沙粒距离绝缘子表面较近，电位从悬浮沙粒至绝缘子表面降低的幅度有限，故对绝缘子沿面电位具有抬升作用。带负电沙粒汇聚周围电场线，且附近具有较高的负电位，电位从沙粒表面向外逐渐升高，悬浮沙粒距离绝缘子表面较近，电位从悬浮沙粒至绝缘子表面升高的幅度有限，故对绝缘子沿面电位具有降低的作用。

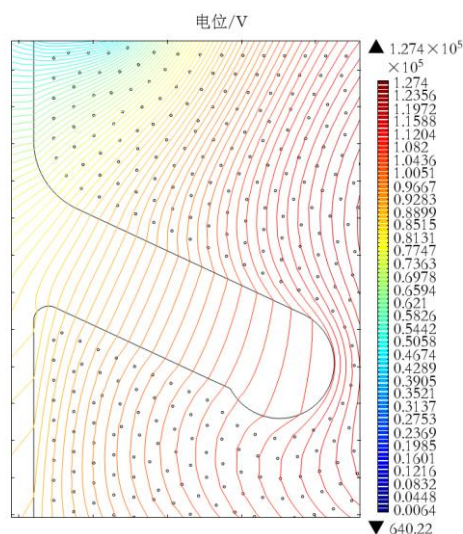


图 5.16 悬浮带电沙粒时绝缘子等位线分布仿真截图

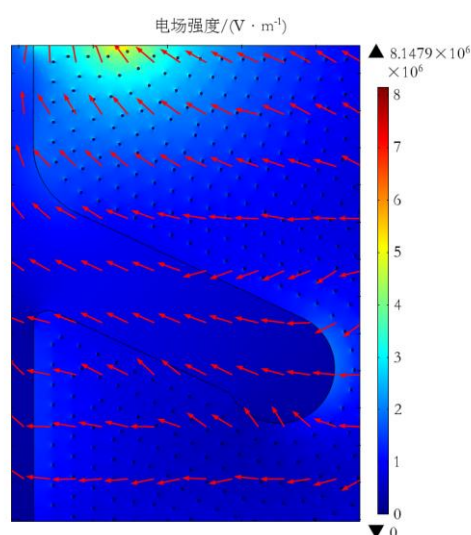


图 5.17 悬浮带电沙粒时绝缘子电场分布仿真截图

对于带电沙粒和电中性沙粒的混合粒子群环境，带电沙粒对绝缘子沿面电位和电场的畸变起了主要作用，粒子群中的电中性沙粒起到了畸变电位和电场的辅助作用，从而带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度略大于混合粒子群中带电沙粒单独对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度。对于正负极性沙粒的混合粒子群环境，正极性与负极性沙粒的电场线相互叠加造成粒子群对绝缘子沿面电场的畸变幅度介于粒子群中正极性或负极性沙粒单独对绝缘子沿面电场的畸变幅度之间。

绝缘子表面覆沙、沙尘天气附加电场、空气中悬浮沙粒环境下绝缘子电场分布特具

特点，比较不同沙尘环境对绝缘子沿面电场的畸变幅度，得出悬浮沙粒带电是沙尘环境畸变绝缘子沿面电场分布的重要原因。

5.4 小结

分析了悬浮沙粒对接触网绝缘子电位和电场分布的影响。悬浮的电中性沙粒会小幅畸变绝缘子沿面电位和电场；悬浮沙粒带上相同电量后，对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度加大，且畸变幅度受悬浮沙粒的数量、粒径、带电量的大小和极性影响明显。带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度大于混合粒子群中带电沙粒单独对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度，而小于粒子群中全部沙粒带上相同电量时对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度；正负极性沙粒混合粒子群对绝缘子沿面电位的畸变幅度较小，而对绝缘子沿面电场的畸变幅度介于粒子群中的正或负极性沙粒单独对绝缘子沿面电场的畸变幅度。

结 论

本文以电气化铁路接触网专用的 QBN-25 型号腕臂棒形瓷绝缘子为研究对象, 基于静电场有限元法建立了沙尘环境下绝缘子电场数值计算的仿真模型。应用人工截断法设置合理的空气域边界, 将绝缘子电场分布问题的求解由无限开区域转化为有限闭区域, 并设置无限元区域解决了绝缘子电场的远场耗散问题。应用 COMSOL Multiphysics 有限元软件计算分析了绝缘子在表面覆沙、沙尘电场、空气中悬浮沙粒影响下的沿面电场分布特性。

取得的主要研究成果如下:

(1) 清洁环境下绝缘子沿面电场强度呈非对称“U”形分布, 绝缘子沿面电位和电场分布受绝缘子几何形状影响明显; 绝缘子表面沉积沙尘会降低覆沙处的场强; 当沙层中出现无沙带时, 无沙带处的场强将会升高。

(2) 沙尘电场会使绝缘子圆周方向的电场发生改变; 在沙尘天气电场作用下, 水平安装绝缘子沿面的场强在高压端附近降低; 绝缘子倾斜安装时, 在沙尘暴天气的负电场作用下, 绝缘子沿面的场强降低, 而在浮尘、扬沙天气的正电场作用下, 绝缘子沿面的场强升高。

(3) 空气中悬浮的电中性沙粒可小幅畸变绝缘子沿面电位和电场; 悬浮沙粒带上相同的电量后, 绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度加大, 其畸变幅度受悬浮沙粒的粒径、数量、带电量的大小和极性影响明显; 带电沙粒与电中性沙粒的混合粒子群对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度大于混合粒子群中带电沙粒单独对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度, 而小于粒子群中全部沙粒带上相同电量时对绝缘子沿面电位和电场的畸变幅度; 正负极性沙粒混合粒子群对绝缘子沿面电场的畸变幅度介于粒子群中的正或负极性沙粒单独对绝缘子沿面电场的畸变幅度。

(4) 各种沙尘环境均会不同程度畸变绝缘子沿面电场, 各具特点, 悬浮沙粒带电是绝缘子沿面电场畸变的重要原因。

论文需要进一步的研究方向有:

(1) 复合材料绝缘子在接触网应用量逐年增加, 其材质、构造与瓷质绝缘子有较大差异, 沿面电场特性也会不同, 可研究沙尘环境下复合绝缘子电场分布特性。

(2) 研究绝缘子表面潮湿污秽和悬浮沙粒共同作用下的绝缘子沿面电位和电场分布特性。

致 谢

时光飞逝，转眼间为期三年的硕士研究生学习生活即将接近尾声。由衷地向在此期间给予我帮助的老师、同学、朋友和亲人表示深深的感谢。

感谢我的导师张友鹏教授给予我学术上细心的指导，导师严谨的治学态度将深深地影响着我今后的科研之路。还要感谢导师对我在为人处事上的谆谆教诲，这使得我在读研期间各方面能力都有了很大的提升。

感谢学院 503 实验室的所有同门兄弟姐妹，大家在平日里给予了我学习和生活上很大的鼓励和帮助。

感谢我的父母、妻子对我生活上无微不至的照顾和关怀，也要感谢我的女儿赵晗宇，她的降生是上天在我读研期间赐予我最宝贵的礼物。

参考文献

- [1] 钱正安,宋敏红,李万元.近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J].中国沙漠,2002,22(2): 106-111.
- [2] 董治宝,王涛,屈建军.100a 来沙漠科学的发展[J].中国沙漠,2003,23(1):1-5.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 郑晓静,黄宁,周又和.风沙运动的沙粒带电机制及其影响的研究进展[J].力学进展,2004,34(1):77- 86.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 黄道春,黄正芳,王国利等.特高压交流输电线路瓷绝缘子串电位和均压环电场分布计算模型的简化[J].高电压技术,2012,38(9):2163-2170.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Gill E. W. B..Frictional electrification of sand[J].Nature,1948,18(4):568-569.
- [27] Latham J..The electrification of snowstorms and sandstorms[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1964,90(5):91-95.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Schmidt D. S..Electrostatic force on saltating sand[J].Journal of Geophysical Research,1998,103(4):8997-9001.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Sima W. X.,Yang Q.,Ma G. Q..Experiments and analysis of sand dust flashover of the flat plate model[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(2):572-581.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 吴宗汉.基础静电学[M].北京:北京大学出版社,2010:2-15.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 关志成.绝缘子及输变电设备外绝缘[M].北京:清华大学出版社,2009:26-28.

- [45] 严璋,朱德恒.高电压绝缘技术[M].北京:中国电力出版社,2007:5-18.
- [46] 蒋兴良,舒立春,孙才新.电力系统污秽与覆冰绝缘[M].北京:中国电力出版社,2009:4-10.
- [47] 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一部分:棒形瓷绝缘子[S]:2-8.
- [48] 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.
- [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.
- [51] 张学敏.MATLAB 基础及应用[M].北京:中国电力出版社,2009:65-68.
- [52] 薛定宇,陈阳泉.高等应用数学问题的 MATLAB 求解(第 3 版)[M].北京:清华大学出版社,2013:313-318.

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] ZHAO Shanpeng, ZHANG Youpeng, CHEN Zhidong, DONG Haiyan. Calculation of electric field characteristics of insulator under sandstorm condition[J].TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering,2014,12(2): 1169-1176.
- [2] 张友鹏,赵珊鹏,陈志东,周郁,董海燕,王思华.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,录用.

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.
- [2] 沙尘环境下接触网绝缘子电场分布研究.兰州交通大学青年科学基金,2014年1月-2016年12月,2013038.参与.