

沙尘环境下绝缘子交流闪络特性的研究



重庆大学硕士学位论文

学生姓名：程 浩

导师姓名：司马文霞 教授

专 业：电气工程

学科门类：工 学

重庆大学电气工程学院

二〇一一年五月

Study on AC Flashover Performance of Insulation Surface under Wind Sand Environment



A Thesis Submitted to Chongqing University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering

By

Cheng Hao

Supervised by Prof. Sima Wenxia

Major: Electrical Engineering

College of Electrical Engineering of
Chongqing University, Chongqing, China
May 2011

摘 要

近年来, 频繁发生的沙尘暴对我国多个省份的工、农业生产与人民生活造成了严重影响, 特别是对于高压电网线路外绝缘的危害尤为突出, 已多次造成大面积输电线路发生闪络事故。对于外绝缘而言, 沙尘暴的影响主要体现在严重积污和周围介质环境的改变, 一方面, 沙尘暴发作时空气中的风沙和盐分矿物等固体微粒含量显著增加, 容易导致绝缘子串表面积污, 增加污秽闪络发生的风险; 另一方面, 沙尘暴气候下环境介质会由原来的较纯净空气介质变为多物质含量的混合介质, 线路外绝缘结构的工作环境将会发生很大转变。本文在参阅相关文献和已有研究成果的基础上, 采取理论分析和实验相结合的方法, 以XP-70瓷绝缘子为研究对象, 重点研究了这两大方面对绝缘子交流闪络特性的影响规律。

本文通过大量的人工污秽试验发现: XP-70 瓷绝缘子交流闪络电压随风速的增大而升高, 风沙环境下的闪络电压比有风无沙时低; 随着沙尘颗粒带电量的增大, 绝缘子的交流闪络电压降低, 且沙粒带正电荷时绝缘子交流闪络电压较带负电荷时低; 沉积的沙粒对污秽绝缘子闪络电压的影响与盐密无关, 是独立的, 同时绝缘子闪络电压的变化与沙尘沉积量有关, 沉积密度较小时, 绝缘子的交流闪络电压随沉积密度的增大而降低, 沉积密度增大到 $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 后, 绝缘子的闪络电压反而有升高的趋势。

不溶性污秽物类型的不同对绝缘子闪络电压的影响存在差异, 本文通过人工污秽试验研究了两种不溶性污秽物对绝缘子闪络电压影响的差异, 结果表明在相同沉积量下, 绝缘子表面沉积沙尘时其闪络电压下降的幅度较小, 因此, 在风沙较大的地区用硅藻土模拟沙尘颗粒制定污秽等级的相关标准是安全的。

本文建立了沙尘暴环境下 XP-70 瓷绝缘子的电场仿真模型, 并对绝缘子在沙尘环境下的沿面电场分布进行了仿真计算, 结果表明风沙环境下绝缘子沿面电场分布受周围沙尘颗粒的影响较小, 但沙粒带电荷后对其电场分布有较大的畸变作用, 在出现带电沙粒的区域, 其电位分布变化显著, 且绝缘子沿面电场强度明显增大; 沉积沙尘时绝缘子表面出现无沙区域后, 该区域内电场强度增大。

利用高速摄像机拍摄了绝缘子在风沙环境中以及沉积沙粒时的闪络过程。大风作用下绝缘子闪络时出现明显的飘弧现象, 延长了电弧的发展时间; 少量沙尘沉积时随着施加电压的升高, 沙粒会发生跳跃并向四周运动, 在局部形成无沙区域, 而沙尘沉积量较大时, 在放电通道有沙粒跳跃, 但没有明显的无沙区域形成。

关键字: 风沙天气, 绝缘子, 污秽, 电场仿真, 闪络特性

ABSTRACT

Recently, frequent sand storm has caused great damage to the industry, agriculture and people's lives in many provinces of China, especially to the high voltage transmission line external insulation, which has brought about large area flashover accident of the transmission line. Regarding the external insulation, the influence of sand storm is mainly reflected in two aspects, serious contamination and the change of medium environment surrounding the insulators. On one hand, when sand storm breaks out, the sand and mineral salt and other solid particles in the air are increasing significantly, which is very likely to cause contamination on the surface of insulators, and that can then make the pollution flashover more possible to happen; on the other hand, in the background of sand storm, medium environment changes from pure air medium into the mixed medium of multi-material content, which brings great changes to the operating environment of transmission line's insulation structure.

Based on the analysis of the literature and the research results relating to this topic, taking XP-70 porcelain insulators as the research object, with the methods of the combination of theory and experiment, this paper mainly researches the laws of the above two aspects' influence to AC flashover performance.

Through a number of tests, it is found that the flashover voltage of the XP-70 porcelain insulator increases with the increase of the wind speed in wind sand environment under the AC voltage, and that the flashover voltage in weather of wind dust is lower than in the weather of wind. The flashover voltage of the XP-70 porcelain insulator decreases with the increase of the sand specific charge, and the flashover voltage of the sand with positive charge is lower than it with negative charge. When the sand particles deposit on the surface of the insulator, the changes of insulator's flashover voltage is related to the sand dust deposition. In low deposition density situation, the flashover voltage decreases with the sand dust deposition density increasing, and when the deposition density exceeds 20mg/cm², the flashover voltage appears to go up.

Different insoluble pollution materials have different influences on insulator flashover voltage. In this paper, the two pollution materials, sand particles and diatomite are compared and analyzed, and through the artificial pollution test, this paper researches the differences of the two insoluble pollution materials' influences to

insulator flashover voltage. The result proves that, with the same deposition density, sand on insulator's surface causes less decline of its flashover voltage. Therefore, it is safe that using diatomite to simulate sand particles in order to set pollution grade standards in heavy sand storm area.

This paper sets up an electric field simulation model of XP-70 porcelain insulator in sand storm environment, and then calculates the electric field distribution on insulator's surface in sand storm environment. The result proves that sand particles surrounding the insulator have less influence on the electric field distribution on insulator's surface, however, charged sand particles can cause the aberrance of its electric field distribution. In the area with charged sand particles, the strength of the electric field on insulator's surface increases evidently; when there appears areas without sand particles, the electric field strength increases in that area.

Using the high speed camera, the process of the flashover of the insulator in wind sand environment and sand particles deposition on surface is photographed. The arc is blown from the insulator surface by the strong wind, which extends the development of the arc. When there is little sand dust depositing on surface, with the voltage going higher, sand particles jump and expand, areas without sand particles appear, but when plenty of sand dust deposits, there are sand particles jumping in discharge path, but no areas without sand particles.

Key words: weather of sand dust; insulator; pollution; electric field simulation; flashover performance.

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
1 绪论	1
1.1 课题提出的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 沙尘环境下沙粒起电的研究.....	2
1.2.2 沙尘环境对空气间隙放电特性影响的研究.....	4
1.2.3 沙尘环境对平板模型放电特性影响的研究.....	6
1.2.4 沙尘环境下绝缘子积污特性的研究.....	9
1.3 本论文的主要研究内容	10
1.4 本章小结	10
2 试验装置及方法	11
2.1 试品	11
2.2 试验设备装置	11
2.3 试验电路	13
2.4 试验方法	15
2.4.1 沙粒带电量测量方法.....	15
2.4.2 人工污秽试验方法.....	16
2.4.3 加压方式.....	17
2.4.4 试验数据的获取方法.....	17
2.5 本章小结	17
3 沙尘环境下瓷绝缘子闪络特性的试验研究	18
3.1 引言	18
3.2 沙尘环境对瓷绝缘子闪络电压的影响	18
3.2.1 风速对绝缘子交流闪络电压的影响.....	18
3.2.2 沙粒电荷量对绝缘子交流闪络电压的影响.....	19
3.2.3 沙尘沉积量对污秽绝缘子交流闪络电压的影响.....	20
3.2.4 不溶性污秽类型对绝缘子交流闪络电压的影响.....	22
3.3 沙尘沉积下污秽绝缘子泄漏电流分析	25
3.3.1 沙尘沉积量对泄漏电流工频分量的影响.....	26
3.3.2 沙尘沉积量对泄漏电流谐波特性的影响.....	29

3.4 本章小结	31
4 试验条件下瓷绝缘子沿面电场仿真	33
4.1 沙尘环境下瓷绝缘子电场计算模型	33
4.1.1 有限元法电场计算基本原理	33
4.1.2 COMSOL Multiphysics 软件介绍	34
4.1.3 瓷绝缘子电场仿真模型的建立及其参数设置	36
4.2 电场仿真计算结果及分析	38
4.2.1 风沙环境对瓷绝缘子电场分布的影响	38
4.2.2 沙粒带电量对瓷绝缘子电场分布的影响	40
4.2.3 沙尘沉积对瓷绝缘子电场分布的影响	42
4.3 本章小结	44
5 沙尘环境下绝缘子沿面闪络过程及放电机制分析	45
5.1 引言	45
5.2 扬沙环境下绝缘子沿面闪络过程分析	45
5.3 沙尘沉积环境下绝缘子沿面闪络过程分析	47
5.4 本章小结	52
6 结论与展望	53
6.1 主要结论	53
6.2 后续研究工作的展望	54
致 谢	55
参考文献	56
附 录	60

1 绪 论

1.1 课题提出的背景和意义

根据我国能源资源赋存和电力负荷分布极不均衡的状况，西电东送、南北互供、全国联网势在必行，同时国家电网公司计划在“十二五”初期初步建成以“两纵两横”特高压骨干电网为中心的坚强智能电网。目前我国已建成的特高压直流输电最高电压等级为 $\pm 800\text{kV}$ （向家坝—上海），交流输电最高电压等级为 1000kV （晋东南—南阳—荆门），并已经投入应用，形成了覆盖范围广、电压等级高的输电走廊。因此，随着输电电压等级的提高以及大电网的形成，对电力系统输变电设备的可靠性提出了更高要求，系统一旦发生故障，将造成大面积的停电，其维修费用和造成的经济损失都是无法估量的，所以电网的安全运行显得格外重要。

我国西北地区植被稀疏，沙漠、戈壁广布，土地沙漠化严重，同时由于受到不合理的人为经营活动的破坏，当地生态环境急剧恶化，自 50 年代以来，沙漠、戈壁和沙漠化土地面积已达 165.3 万平方公里，并正以每年 2460 平方公里的速度发展。严重的土地荒漠化导致了强烈的沙尘暴活动，其覆盖范围极其广泛，西起新疆的喀什，东至黑龙江的富锦，东北至呼玛，西南至西藏的隆子，涉及新疆、甘肃、宁夏、内蒙古、河北、北京、辽宁、黑龙江、西藏等 15 个省（区）市^[1]。从 90 年代起，我国北方进入沙尘暴活动相对活跃时期，并多次出现影响长江流域的强沙尘暴。进入新世纪后，沙尘暴活动范围出现向南方扩散的趋势，2007 年 4 月 2 日，沙尘暴南下到达“长三角”地带，导致上海各地区遭遇了 7 年以来最为严重的浮沉天气，全城笼罩着一片灰黄色的“尘雾”。沙尘暴空袭东南沿海的同时也向西南地区蔓延，使川、渝、云、贵各省市和三峡库区相连的大片区域出现严重的浮沉天气，能见度极低，白昼似黄昏。在强烈的沙尘暴活动过程中，沙尘颗粒之间以及沙尘颗粒与地床面之间的非对称摩擦使沙粒带上了电荷，形成强烈的负极性电场^[2]。而沙尘暴活动过程中形成带电沙粒将对输电线路的相间及相对铁塔空气间隙和绝缘子放电特性产生影响进而影响到电力系统的可靠运行。

强烈的沙尘暴活动已经严重的影响了我国电力系统的安全运行，造成多起停电事故。2006 年 3 月 28 日，郑州发生沙尘暴天气，当天共发生电力故障 30 多起，造成两条高压线跳闸，出现大面积停电现象。2006 年 4 月 9 日，新疆吐鲁番地区出现罕见的特强沙尘暴天气，瞬间最大风速高达到 51m/s ，受其影响，新疆电网 220kV 红托线等 4 条线路相继跳闸，新疆电网与哈密电网解列运行。2007 年 3 月 24 日，从内蒙古中西部和吉林西部出现大面积沙尘暴天气，并向北方大部分地区蔓延，造成宁夏平罗县部分地区供电中断，内蒙古二连浩特市全市停水 8 小时，

城区大面积停电达 16 小时，部分网络中断 10 余小时，由于电线短路，电视冰箱等家用电器损失严重。2008 年 5 月 2 日，甘肃河西、白银等地区突遭罕见强沙尘暴袭击，造成了金昌电网倒塔断线，多条输、配电线路跳闸，武威地区所辖输、配电线路及农网、大用户专线不同程度发生跳闸，损失负荷 15 万千瓦，损失电量约 60 万千瓦时。无独有偶，沙尘暴天气也给世界其他各国的电力系统带来不同程度的破坏。20 世纪 70 年代埃及的 Khamassine 地区，春季沙尘暴频发，造成 500kV 和 200kV 输电线路跳闸率比其他地区同一时期高很多。80 年代末，埃及和沙特阿拉伯发生了多起沙尘天气，造成高压线路短路跳闸，大面积停电的事故。2006 年 2 月 12 日，受晨露和沙尘的影响，导致高压线路绝缘体短路，悉尼南部和北部地区断电，约三万名居民失去电力供应。2008 年 5 月 26 日，蒙古国中东部和西部戈壁地区出现沙尘暴天气，导致高压线路受损，东方省和苏赫巴托尔省断电。

为实现“西电东送”、“疆电东送”，输电线路会跨越大量的风沙环境地区，例如新疆哈密至甘肃永登 750 kV 输变电工程就经过新疆和甘肃两大沙尘暴频发区。此外，西南地区丰富水电资源的开发、输送通道都要经过高海拔、重污秽、潮湿地区，西北地区的沙尘、尘暴蔓延到这些地区形成的沙尘湿雾，会对超、特高压输电空气间隙和绝缘子串的放电特性有何影响，已经成为“西电东送”和西部电网发展极为关注的课题。因此，深入系统地研究沙尘暴环境对电力系统的影响，既有着重要的学术价值，又对“西电东送”战略具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 沙尘环境下沙粒起电的研究

伴随着沙尘暴的产生，人们发现了风沙流中的强电场及电火花现象。文献[3-7]表明，早在上世纪 40 年代 Gill 等国外学者已经就风沙起电现象进行了深入的研究。根据风沙起电和飘雪起电有相似性，Latham 把沙粒带电归结为由于沙粒间不对称摩擦产生的温度梯度造成正负电荷分离，第一个提出不对称摩擦起电的概念^[4]：沙尘在随风移动过程中，沙粒间的相对运动导致碰撞摩擦，沙粒粒径的不同导致表面积不同的沙粒间形成温度梯度，小颗粒温度较高，大颗粒温度较低；而附着于沙粒表面的水分子会游离出 H^+ 和 OH^- 离子，表面温差便更大， H^+ 离子聚集于大粒子上而带正电荷，小粒子留下 OH^- 离子带负电荷，从而形成电荷分离。国内学者屈建军^[2]等通过实验也得出相似的结论，同时提出沙粒与床面之间的不对称摩擦在风沙电效应中起主要作用。针对沙粒带电临界粒径的实验测定因地区不同产生差异：Greeley^[7]通过风洞试验得出的结论表明临界粒径为 $60\mu m$ ；郑晓静^[8]等人通过野外环境风洞试验得出的结论为沙粒粒径小于 $250\mu m$ 时，运动沙粒带负电，而当直径大于 $500\mu m$ 时，运动沙粒带正电。

在进行风沙电效应试验测量的同时，研究人员也发现了风沙电场的存在。Schmidt^[5]研究小组采用大气电场仪对野外的风沙电场进行了试验性研究，结果表明：风沙电场方向垂直地面向上，与晴天电场方向相反；风沙流速度在 12m/s 时测得的地面电场最大值为 166kV/m，最大场强处距地面 0.017m。根据实验测量结果，Schmidt^[5]拟合出风沙电场的解析表达式，如(1.1)式所示，式中 E 是风沙电场强度，单位为 kV/m， y 是测量点距地面高度，单位为 cm。

$$E = 51y^{-0.6} \quad (1.1)$$

文献[9]通过野外实地测量，发现不同沙尘天气过程下产生的电场强度和极性不同，如表 1.1 所示，其中 $E1$ 、 $E2$ 、 $E3$ 、 $E4$ 分别表示距地面 16m、8m、4m、1m 处的平均电场强度，并且发现电场强度随风速的变化而变化。

表 1.1 不同沙尘天气过程时电场强度

天气过程	E1 (kV/m)	E2 (kV/m)	E3 (kV/m)	E4 (kV/m)
浮尘	0.956	5.229	2.756	0.832
扬沙	-9.451	3.780	2.165	0.903
强沙尘暴	-36.755	-6.899	-2.571	-0.308

文献[10-13]中试验模拟了沙尘暴中蠕移跃移扬沙、悬移扬沙和加水悬移扬沙三种情况下的电场状况，结论如下：在蠕移跃移扬沙、悬移扬沙和加水悬移扬沙三种实验方案中，测量所得的电场表现为负极性，最大值达-74 kV/m；电场强度与沙尘运动状态、风速、物质粒径、含水量、气流稳定度及高度有关，在沙尘三种运动方式中，电场强度随风速的增大而增大，随沙尘颗粒的粒径增大而减小；含水量对电场有一定的影响，在加水悬移实验中，当含水量在 0.5%~1.0%之间时，电场强度会显著增加；但是含水量达到 2%后，电场强度又开始迅速减小。

文献[8,13-19]在野外环境风洞通过实验测量，针对沙粒带电荷极性、荷质比、输沙率以及风速廓线等宏观物理量进行研究，结果表明：电荷量计算得到的正电荷最大荷质比 158 μ C/kg，低于计算得到的负电荷的最大荷质比 304 μ C/kg；沙粒粒径和风速对沙粒荷质比的影响规律相似，均是荷质比随粒径和风速的增大而减小，荷质比随高度的上升而增加；风沙流中的电场是由运动的带电沙粒形成的，电场强度方向为垂直地面向上，与晴天大气电场的方向相反；在相同风速下，风沙流中的电场强度值与粒径有关，由小粒径沙粒为主的风沙流，其电场强度大于大粒

径沙为主时的电场强度；在相同粒径范围内，电场强度随风洞轴线沙流的风速和高度的增大而上升；大小沙粒混合形成的风沙流中的电场比均匀粒径沙流中的电场大得多，在风速为 20m/s 时，前者的最大值高出后者 20 倍以上。

文献[20]实验模拟了沙尘暴天气下沙尘对导线电位的影响，得到以下规律：随着风速和输沙量的增大，导线电位呈现指数规律递增的趋势；随沙粒粒径的增大，电位差极值出现的高度具有上升的趋势，且电位差极值减小，沙尘暴中导线的电位高于扬沙天气；伴雨环境下的沙尘暴较之无雨环境下的沙尘暴，导线具有较强的电位差；相同材料的导线，直径愈细，其电位差愈大，导线直径基本相同时，铝线比铜线具有更强的电位差，且当两端加压 2kV~4kV 时会出现尘端放电现象。

文献[21]基于水的电离理论和颗粒动力学理论，提出一种风沙运动颗粒碰撞的静电起电模型，颗粒表面覆盖有水分子薄层，颗粒间的碰撞导致能量转移和颗粒温度变化；水电离生成 H_3O^+ 和 OH^- 离子，当两个温度不同或水分子薄层正(负)离子浓度不同的颗粒相接触时， H_3O^+ 比 OH^- 以更快地速度从浓度高的地方向浓度低的地方迁移；在动力学的模拟计算中采用 0.1mm, 0.2mm 和 0.4mm 三种粒径的沙粒表示沙粒直径分布差异，并对沙源地沙粒进行采样分析，沙粒数量选取为 750 粒，100 粒和 50 粒，模拟结果表明：在三种直径下的颗粒系统中，不同大小颗粒的平均带电量随时间的变化规律为大颗粒的平均带电量为正、小颗粒的平均带电量为负，这一结果有助于解释风沙电场产生的机理，同时也定性的解释了颗粒摩擦起电需要一定的湿度环境。

1.2.2 沙尘环境对空气间隙放电特性影响的研究

① 沙尘环境对棒-棒空气间隙冲击放电特性的影响

文献[22-27]研究表明：在雷电、操作冲击电压作用下，沙尘对棒-棒气隙的 50% 击穿电压的影响与间隙距离有关，如图 1.1~图 1.4 所示。根据间隙距离对 50% 击穿电压的影响，可将气隙距离分为三个区间：短气隙、中等长度气隙和长气隙。

短气隙区间，施加负极性冲击电压作用时，沙尘环境导致间隙 50% 击穿电压减小，且使得间隙击穿电压分散性变小，对于间隙击穿时间的影响是沙尘环境导致间隙击穿时间分散性变小；施加正极性冲击电压作用时，沙尘环境导致间隙 50% 击穿电压减小。

中等长度气隙区间，施加负极性冲击电压作用时，沙尘环境使间隙 50% 击穿电压增大，且导致间隙击穿电压和间隙平均击穿时间的分散性都变大；施加正极性冲击电压作用时，沙尘环境导致间隙 50% 击穿电压减小。

长间隙区间，分别施加正、负极性冲击电压时，沙尘环境对间隙 50% 的击穿电压没有影响。

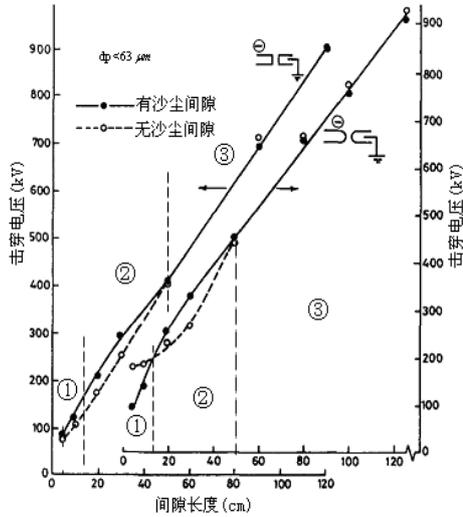


图 1.1 负极性雷电冲击电压

作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离关系
Fig.1.1 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative lightning impulse

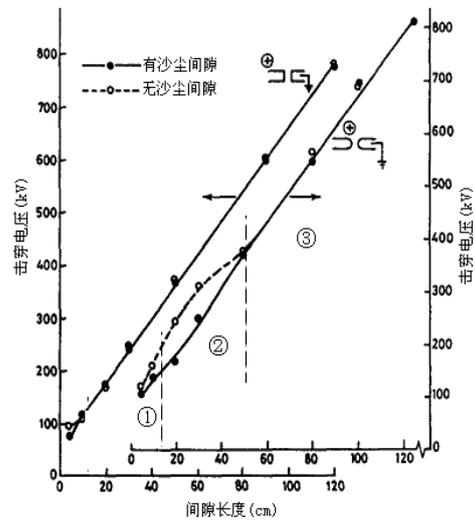


图 1.2 正极性雷电冲击电压

作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离关系
Fig.1.2 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive lightning impulse

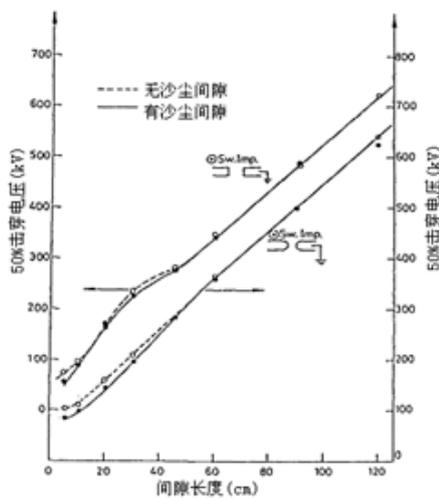


图 1.3 负极性操作冲击电压

作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离关系
Fig.1.3 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative switching impulse

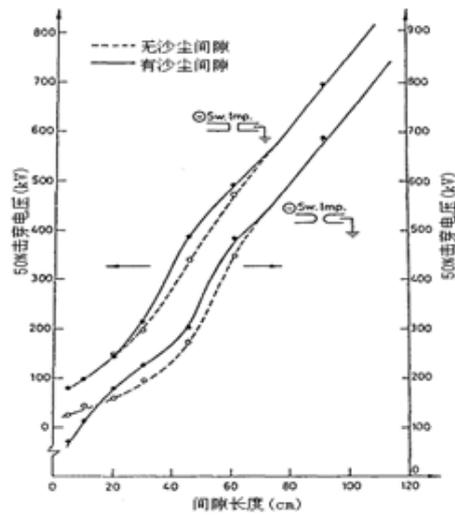


图 1.4 正极性操作冲击电压

作用下间隙 50% 击穿电压与间隙距离关系
Fig.1.4 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive switching impulse

② 沙尘环境对棒-板空气间隙冲击放电特性的影响

文献[22-27]表明, 分别施加雷电、操作冲击电压时, 在正极性冲击电压作用

下，棒-板间隙有无沙尘对其 50% 击穿电压无明显影响；负极性冲击电压作用下，沙尘环境对棒-板间隙的 50% 击穿电压与间隙距离有关，如图 1.5 所示。

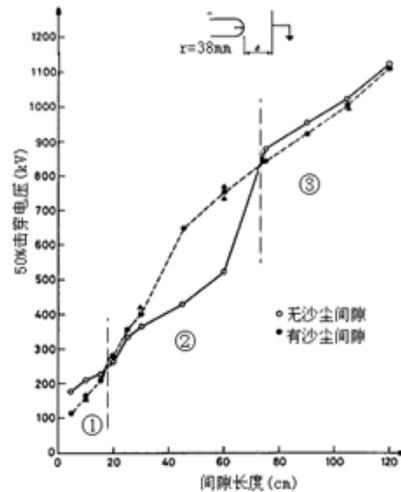


图 1.5 在负极性雷电冲击电压作用下沙尘对击穿电压的影响与间隙距离关系

Fig.1.5 50% breakdown voltage as a function of gap Length under negative lightning impulse

施加负极性冲击电压，根据间隙距离对 50% 击穿电压的影响，可将气隙距离分为三个区间：短气隙、中等长度气隙和长气隙。短间隙区域，沙尘使间隙 50% 的击穿电压降低，使 50% 击穿电压的分散性变小，沙尘使间隙平均击穿时间变短以及使击穿时间的分散性变小；在中等长度间隙区域，沙尘使间隙 50% 的击穿电压升高，50% 击穿电压的分散性没有明显变化，间隙平均击穿时间变长以及使击穿时间的分散性变大；在长间隙区域，沙尘对间隙的击穿特性无明显影响。

文献[28-30]针对沙尘环境下空气间隙交流击穿特性进行研究，得出以下结论：有沙尘时，间隙交流击穿电压比无沙尘高，其差值随风速的增大而升高；在一定电荷量变化范围内，间隙交流击穿电压与沙尘的电荷量无关；有沙尘时，间隙的交流击穿电压与间隙之间的沙尘无关，与电极表面的沙尘有关。并且通过 COMSOL Multiphysics 电场分析软件仿真得出当沙尘荷质比为 $1 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ ，沙尘浓度为 10g/m^3 时，此时带电沙尘在空间产生的电场仅为 $2 \times 10^{-5} \text{kV/cm}$ ，对原棒板电极间的电场分布几乎没有影响。

1.2.3 沙尘环境对平板模型放电特性影响的研究

文献[29-33]研究了在工频电压和直流电压作用下沙尘环境对平板模型闪络特性的影响规律，在此基础上分析了风沙作用下平板模型沿面闪络的放电机理。图 1.6、图 1.7、图 1.8 分别是在交流电压作用下沙尘环境各影响因素与平板模型闪络

电压的关系，得出结论^[29-33]：工频交流电压作用下，有风有沙和有风无沙时，平板模型沿面闪络电压比无风无沙时闪络电压高，随风速的增大而增大，当风速达到 4.5m/s后，沿面闪络电压随风速的增大趋势变缓；电荷量在一定范围内变化时，对平板模型沿面闪络电压受的影响很小；当干沙粒沉积到平板模型后，随着沉积量的增加，闪络电压存在极小值，当湿沙粒沉积到平板模型后，随着沙粒含水量的增加，闪络电压存在极大值。

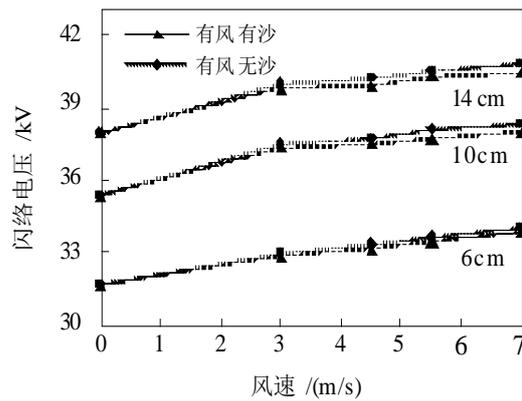


图 1.6 风速与平板模型闪络电压的关系
Fig.1.6 Relationship between the flashover voltage of the flat plate model and the wind velocity

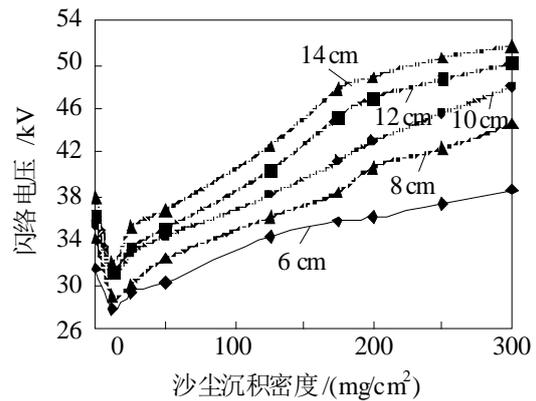


图 1.7 沙尘沉积量与平板模型闪络电压的关系
Fig.1.7 Relationship between the flashover voltage of the flat plate model and the sand deposition density

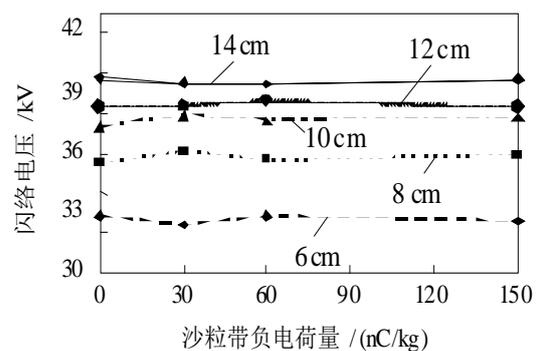
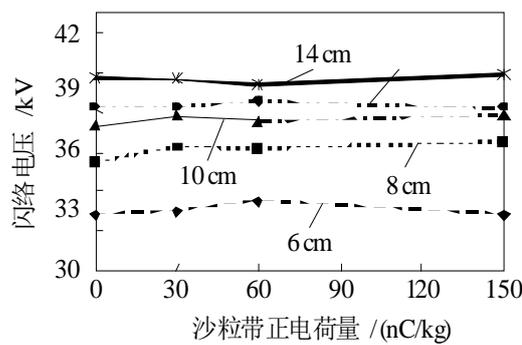


图 1.8 沙粒带电量与平板模型闪络电压的关系

Fig.1.8 Relationship between the flashover voltage of the flat plate model and the charge of sand particles

图 1.9、图 1.10、图 1.11、图 1.12 分别为在直流电压作用下沙尘环境各影响因素与平板模型闪络电压的关系，得出以下结论^[29-33]：有风有沙和有风无沙时，直流负极性下，平板模型沿面闪络电压比无风无沙时高，随风速的增大而升高，有

沙尘时的闪络电压比无沙尘时低，而直流正极性下，有沙尘闪络电压比无沙尘时高；电荷量在一定范围内变化时，沿面闪络电压所受的影响很小；随沙粒沉积量的增加，直流负极性电压作用下，闪络电压存在极小值；直流正极性电压作用下，闪络电压存在极大值；直流沙闪络电压特性存在明显的极性效应。

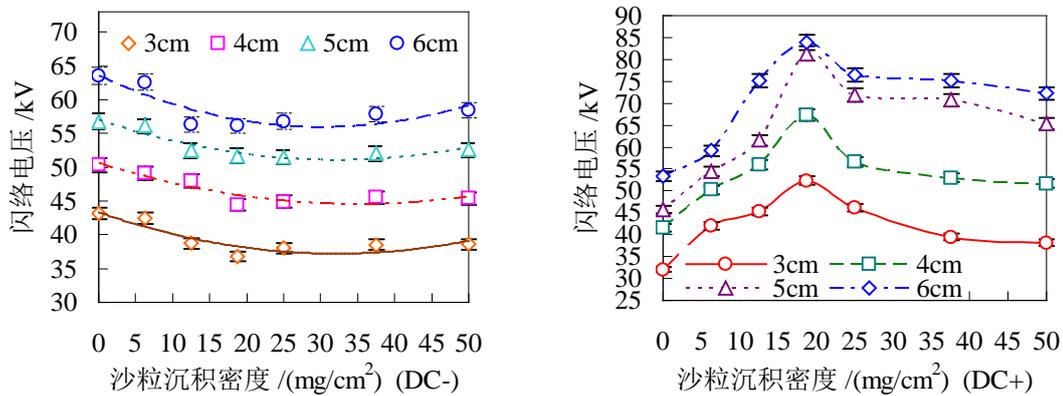


图 1.9 直流电压作用下沙粒沉积密度与平板模型闪络电压的关系

Fig.1.9 Relationship between the flashover voltage of the flat plate model and the sand deposition density under the DC voltage

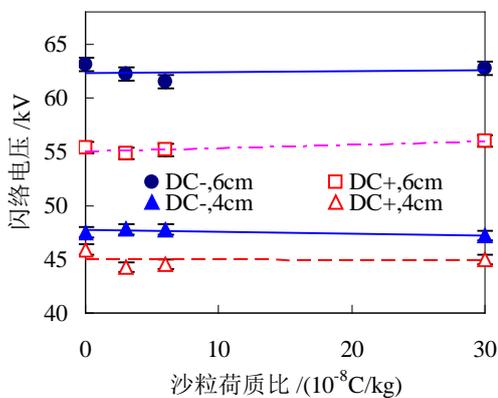


图 1.10 沙粒带正电荷时平板模型闪络电压与电荷量的关系

Fig.1.10 Relationship between flashover voltage of flat plate model and positive charge of sand particles

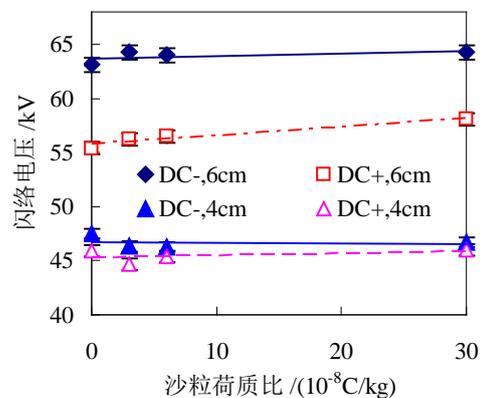


图 1.11 沙粒带负电荷时平板模型闪络电压与电荷量的关系

Fig.1.11 Relationship between flashover voltage of flat plate model and negative charge of sand particles

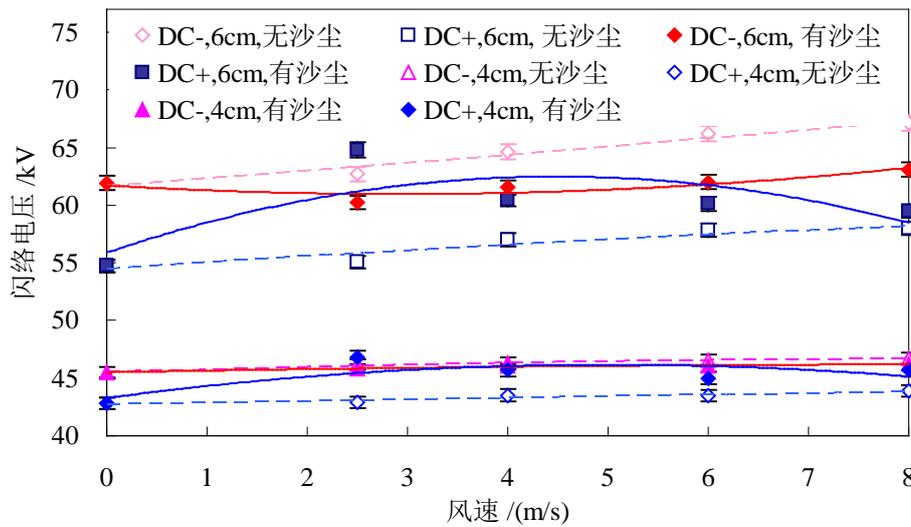


图 1.12 风速与平板模型闪络电压的关系

Fig.1.12 Relationship between the flashover voltage of the flat plate model and the wind velocity

在综合分析实验结论和闪络过程的基础上，提出绝缘表面有沙尘沉积时的沿面闪络机理^[29-33]：沉积的沙粒改变了介质表面的特性，沉积密度较小时，在闪络过程中会形成明显的“无沙区域”，无沙区域更容易产生局部放电，有利于闪络的发展；沉积密度较大时，没有出现明显的无沙区域，由于沙粒的阻碍作用，沿面放电电压比无沙时要高。

1.2.4 沙尘环境下绝缘子积污特性的研究

文献[34,35]研究了线路绝缘子的基本积污特性和污层分布规律，主要包括不同伞裙位置积污量对比及分析，同组大、小伞之间积污量对比及分析，沙尘流速、沙尘持续时间对伞裙表面积污量的影响。研究表明^[34,35]：不同风速和时长条件下各伞裙表面之间盐密没有明显差异，在 10m/s 风速、时长大于 75min 后，大伞裙的灰密值明显低于小伞裙，特别是最后一组大、小伞之间，差异尤为明显；流速影响着整个绝缘子串的平均盐密和灰密，在流速为 13m/s 的时候，盐密和灰密均值出现了峰值点，此后随着流速的继续增加，盐密、灰密开始出现下降趋势，灰密的下降趋势比盐密更明显；时长对整串绝缘子伞裙表面平均盐密、灰密的影响和对流速的影响在趋势上相近；在取得极值点前的低流速下，盐密增加速度最快，灰密增加速度很慢，而在较高流速下，灰密增加速度明显加快，盐密增加速度减缓。

综上所述，针对沙尘环境对电力系统外绝缘电气特性的影响，国内外学者将

研究重点集中在沙尘起电效应和沙尘环境下绝缘闪络特性两个方面。研究初期阶段主要从室内模拟试验和野外实地观测两个方面研究沙尘起电效应^[15-18]和沙尘输送模式^[20,21]。近年来,有学者通过人工模拟试验进行了沙尘环境下空气间隙、平板模型放电特性和绝缘子积污特性的研究。发现^[28-33]空气间隙的放电特性受电极表面沉积沙粒的影响较大,而间隙中的沙粒对其影响较小。在平板放电模型放电特性的研究中提出了无沙环的概念,指出无沙环区域的形成对闪络过程有明显的作用。但是针对带有弯曲弧面绝缘结构的电气模型在沙尘环境下放电过程及放电机理的研究还少见报道。

1.3 本论文的主要研究内容

综上所述,尽管对沙尘环境下外绝缘放电特性有了一定的研究成果,但都是针对空气间隙、平板结构等简单电气模型,对带有弯曲弧面绝缘结构的电气模型在沙尘环境下放电特性的研究还少见报道。因此,本文以瓷绝缘子 XP-70 为研究对象,进行交流电压作用下沙尘环境中绝缘子沿面放电特性的试验研究和理论分析,主要工作如下:

①采用人工模拟试验的方法研究沙尘环境下的风速、沙粒电荷量、沙尘沉积量等对绝缘子交流闪络电压的影响规律;并结合高速摄像机拍摄得到的放电照片分析沙尘环境下绝缘子沿面闪络的过程。

②基于有限元数值仿真计算方法,建立瓷绝缘子 XP-70 的电场仿真模型,研究空间介质中存在沙粒时对绝缘子沿面电场分布的影响;

③对比分析具有相似组成成分的沙粒、硅藻土等污秽物质对于绝缘子闪络电压影响关系的异同。

1.4 本章小结

本章提出了论文研究的目的和意义,并对国内外沙尘环境对输电线路外绝缘电气特性影响的研究进行了系统总结,针对目前国内外研究的状况提出了本论文的研究内容。

2 试验装置及方法

根据论文研究的内容和目的，本章分别对扬沙环境及沉沙环境下人工模拟试验的试品、试验装置及原理、试验方法进行了简单介绍。

2.1 试品

在工频电压作用下，为了分析沙尘环境对绝缘子放电特性的影响，采用普通型 XP-70 瓷绝缘子为试品，其基本参数如表 2.1 所示，结构图如图 2.1 所示。

表 2.1 瓷绝缘子试品的参数

Table 2.1 Dimension of the XP-70 porcelain insulator

型号	D/mm	H/mm	L/mm	厂家
XP-70	255	146	295	大连电瓷厂

注：D 为公称直径，H 为结构高度，L 为爬电距离，单位均为 mm。

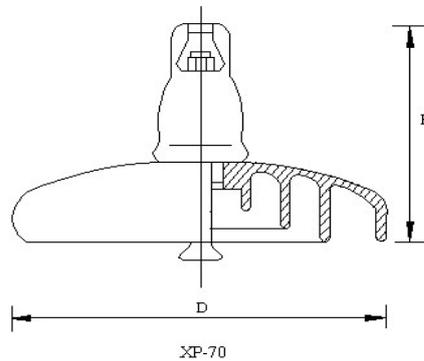


图 2.1 XP-70 瓷绝缘子结构示意图

Fig.2.1 The drawing of structure of the XP-70 porcelain insulator

2.2 试验设备装置

根据风速和能见度的不同，沙尘天气一般分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气情况^[36,37]。同时，受地域气候影响，沙尘暴在不同地区发生时展现的现象也有所区别：在气候干燥的北方地区，沙尘暴发生时往往伴随着大风和飞沙，沙粒不易沉积在绝缘子上，表现为典型的扬沙天气；而在南方气候湿润地区，沙尘季节被尘雾和细雨笼罩，呈现湿度大、风速小的特点，沙尘易沉降在绝缘子表面。本文针对这两种典型的沙尘天气对绝缘子闪络特性产生的影响进行了模拟研究。鉴于扬沙天气发生时气候比较干燥，绝缘子上的污秽对其闪络电压基本无影响，因此

扬沙试验中试品采用洁净的绝缘子，人工模拟试验在实验室自建的模拟扬沙天气的试验装置进行，试验装置如图 2.2 所示；然而频繁发生尘雾天气的气候湿润地区，绝缘子上本已积聚的污秽物质易受潮溶解，同时湿润的绝缘子表面使沙尘更容易沉积其上，增加了污闪的风险，因此浮尘试验中试品采用污秽绝缘子，并以人工涂污的方式使绝缘子积污，为了更真实的模拟湿度大的污秽环境，浮尘试验在多功能人工气候室进行，人工气候试验室如图 2.3 所示。

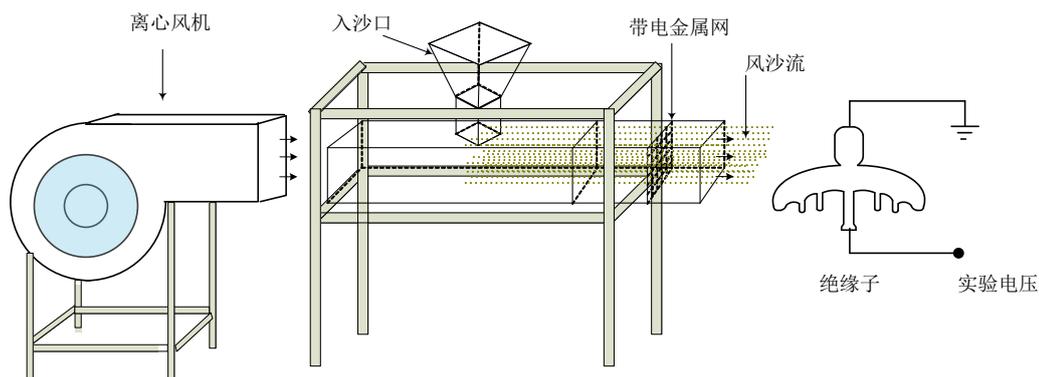


图 2.2 试验装置示意图

Fig. 2.2 The schematic of test device

图 2.3 多功能人工气候室

Fig.2.3 The multi-function artificial climate chamber

图 2.2 所示的风沙模拟装置包括：双吸离心风机，额定功率为 7.5 千瓦，风速可调，最大可达 25m/s；主体装置由铁架支撑，进沙漏斗连接风沙流通道，通道侧面为透明玻璃窗，便于观察。在沙粒带电试验时，可在前端悬挂金属网，并对其施加电压，以便使通过的沙尘与金属网碰撞从而带上电荷。绝缘子试品置于出风

口前端附近，使其受风均匀，同时为了减少实验误差，要严格控制绝缘子试品位置不变。采用 MS6250 型数字风速仪测量风速，其测量范围是 0~20m/s，测量精度为 $\pm 0.1\text{m/s}$ 。试验用沙来源于宁夏沙坡头，沙粒直径变化范围为 0.1~0.315mm。

图 2.3 所示的多功能人工气候室直径 7.8m，高 11.6m。室内环境温度范围为 -45~70℃，温度控制精度为 $\pm 0.5\text{℃}$ 。人工气候室内安装有两排按 IEC 标准推荐制作的喷头，IEC 标准对喷头喷出的雾滴直径、雾量等有严格要求。选用斯普瑞喷雾系统公司生产的 BSPT1/4J 系列喷头，其中喷头的进口直径为 4.0mm，出口直径为 1.0mm。BSPT1/4J 系列气雾喷头通过控制水压调节每分钟的喷水量，可实现雾滴尺寸在 15~200 μm 之间的变化。试验电源从人工气候室中间一侧装设的 330kV 穿墙瓷套管引入。

在试验中，为了拍摄试品绝缘子的放电过程采用 HG-100K 高速摄像机记录，其最大分辨率为 1504 \times 1108pixels，机身内存 4G，最高采用率为 100000 帧/秒，本试验中采用的速度设置为 1000 帧/秒，高速摄像机如图 2.4 所示。

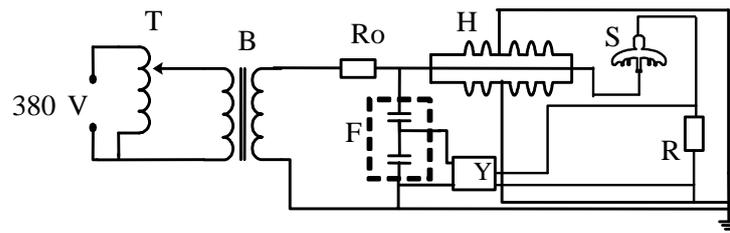


图 2.4 HG-100K 高速摄像机

Fig.2.4 The high-speed camera of HG-100K

2.3 试验电路

扬沙环境人工模拟试验用电源回路如图 2.5 所示，试验电源由调压器和变压器共同组成，其中调压器的主要参数：额定容量为 100kVA，输入电压 380V，输出电压 0~400V；变压器的主要参数：额定容量为 200kVA；额定电流为 1A，输入电压 0~400V，输出电压为 0~200kV。实验电源通过一个穿墙套管引入沙尘暴模拟实验室，试验高压端通过 SGB - 200A 交流电容式分压器连接到数据采集系统，分压器的分压比为 1:1000。为避免实验中电流过大，施加保护电阻 R，其阻值为 5k Ω 。200kV/200kVA 交流试验变压器和 SGB-200A 交流电容式分压器分别如图 2.6、图 2.7 所示。



T: 调压器; B: 变压器; R₀: 保护电阻; H: 高压套管; S: 试品;
F: 电容分压器; Y: 数据采集系统; R: 标准无偏电阻

图 2.5 扬沙环境人工模拟试验电源回路

Fig.2.5 The test circuit of the wind sand environment



图 2.6 200kV/200kVA 交流试验变压器

Fig.2.6 200kV/200kVA AC test electrical source



图 2.7 SGB - 200A 分压器

Fig.2.7 SGB - 200A divider

沉沙环境人工模拟试验用电源回路如图 2.8 所示，变压器的主要技术参数为：输入电压 10kV，输出电压 0~500kV，短路阻抗小于 6.0%，额定容量 2000kVA，

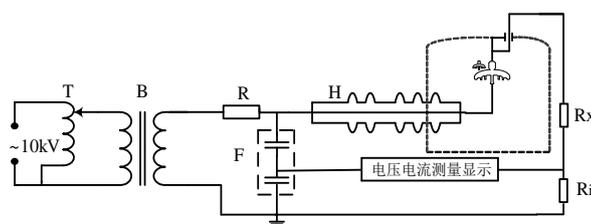


图 2.8 沉沙环境人工模拟试验电源回路

Fig.2.8 The test circuit of sand deposition environment

额定电流为 4.0A，试验变压器在输出电压 500kV 时的最大短路电流 75A，输出电压波形畸变率小于 3%，系统局部放电量小于 10pC，满足 IEC60507 和 GB/T4585 对污秽试验电源的要求。500kV/2000kVA 交流试验变压器和 500kV 交流电容式分压器分别如图 2.9、图 2.10 所示。



图 2.9 500kV/2000kVA 交流试验变压器

Fig.2.9 500kV/2000kVA AC test electrical source



图 2.10 500kV 交流电容式分压器

Fig.2.10 500kV divider

2.4 试验方法

2.4.1 沙粒带电量测量方法

在模拟实验中，为了使沙粒带上一定的电荷量，采用带电金属网使沙尘颗粒通过该金属网从而带上电荷^[38]，如图 2.2 中前端金属网所示，通过改变金属网上所施加的电压的极性和幅值来改变沙粒的带电量极性和大小。沙粒碰撞金属网后的带电量及荷质比具体数值的测量采用网状目标法，其原理如图 2.11 所示，风沙流体穿过带电金属网后，带电沙粒到达网状接收装置，当电荷转移到金属丝网上时，便与地面构成回路，并用精密微安表测量回路中的微电流 I ，待微电流稳定后，在一定时间 t 内计算出发生定向移动的电荷量 q ，同时测出在相同时间内采样桶收集的沙粒质量 m ，则可以测出沙粒的平均荷质比 q/m ^[31]。

在试验中，考虑到测量的精度，用 DQ-2 型数字式冲击电流计代替微安表直接测量电荷量，其中 DQ-2 型数字式冲击电流计是在原有冲击计的基础上改进研制成的，内部含有大规模 CMOS 集成电路和高性能运算放大器及优质电子元器件，量程分为两档： 19.99×10^{-8} 库伦和 199.9×10^{-8} 库伦，分辨率为 10^{-9} 库伦。

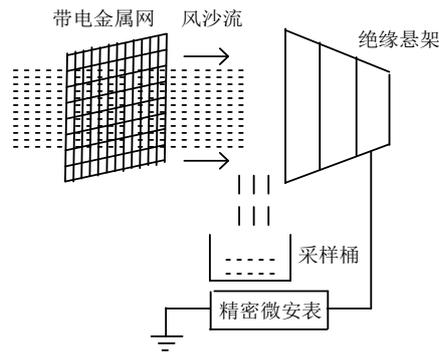


图 2.11 网状目标法原理示意图

Fig.2.11 The schematic of mesh target

2.4.2 人工污秽试验方法

沙尘沉积试验中采用污秽绝缘子，染污方式参照IEC60507-1991推荐的固体层法^[39]、《GB/T4585—2004/IEC60507 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验》^[40-42]等规定，本试验采用定量涂刷法。分别用NaCl和硅藻土模拟污秽物质中的导电物质和不溶性物质，本文根据运行经验采用如下盐密/灰密配比^[43]：交流下盐密为 0.15 mg/cm^2 及以下时，灰密均取 1.0 mg/cm^2 ，盐密大于 0.15 mg/cm^2 时，灰密取 2.0 mg/cm^2 。

①试品预处理：试验前仔细地清洗以除去所有污物和油脂的痕迹后将其垂直悬挂于试品架上阴干，应避免触及已清洗干净的绝缘部件。

②试品染污：定量涂刷方式是指根据试验中试品所需的盐密 (ρ_{ESDD}) 和灰密 (ρ_{NSDD}) 以及试品表面积，计算出每串试品所需要的 NaCl 和硅藻土的用量，并用精度为 0.1 mg 的 TG328B 天平准确称取，称量过程中严格控制误差，要求 NaCl 的误差不大于所需量的 $\pm 1\%$ ，硅藻土的称量误差不大于所需量的 $\pm 10\%$ 。将称量好的 NaCl 和硅藻土各一包，放入用纯净水（电导率 $< 10 \mu\text{S/cm}$ ）清洗干净的瓷碗中，加入适量的纯净水，同时保持用小排刷进行充分搅拌，直至呈现糊状。用小排刷将全部糊状污液均匀地涂刷于试品表面上。在涂抹过程中，要求涂刷均匀，避免将污染物涂刷到钢脚、钢帽上，且尽量避免污液滴落。在称量或涂刷过程中任意环节出现失误，将重新进行该环节。最后将染污均匀的试品悬挂于试验室中自然阴干 24h 待试。

③试品湿润：将涂污的绝缘子试品悬挂静置 24 小时自然阴干后悬置于人工雾室，并同其他任何接地物保持 1.5 m 以上的距离，由蒸汽雾发生器产生蒸汽雾使污层湿润。蒸汽雾由 1.5 t/h 锅炉产生，经由贴近人工气候室底部四周布置的大量放气孔喷出，保证雾汽在室内分布均匀。试验过程中严格控制雾室温度，在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 下，以满足 IEC 60507-1991 标准的要求。由于试品为单片瓷绝缘子，湿润时间较短，

需要 5~8min 的时间。待绝缘子污层充分湿润后立即施加试验电压，直至发生闪络。

2.4.3 加压方式

IEC 60507-1991、GB/T 4585-2004 和 DL/T 859-2004 等相关标准中推荐的人工污秽试验加压方式有三种^[44,45]：恒定电压法、突然加压法和升压法。

恒定电压法是在污秽绝缘子串上施加一定幅值的电压，在加电压的同时，使试品充分受潮，保持作用电压幅值不变，直至闪络；若在规定时间内未发生闪络，再逐级升高电压幅值进行重复试验，直至发生闪络为止。

突然加压法是在绝缘子受潮达到饱和（即污层电导率达到最大值）时，突然加上一定幅值的试验电压，并维持所施加的电压不变，直到闪络；如果不发生闪络，再逐级升高电压幅值进行重复试验，直至发生闪络为止。

升压法是在绝缘子达到饱和湿润时开始施加电压，并逐渐升高电压直至闪络，一般又称为均匀升压法。

本文所考虑的分为无风无沙、有风无沙、有风有沙（沙粒不带电）、有风有沙（沙粒带电）、沙尘沉积和各种不溶性污秽物等六种情况对绝缘子闪络特性的影响，要获得不同风沙环境下每种试品的最大耐受电压或 50% 耐受电压，需要花很长时间，根据实验室的时间安排，完成的难度很大，因此，本文采用均匀升压法对瓷绝缘子的闪络特性进行分析研究。每一污秽度下绝缘子串由 3 串绝缘子组成，每串闪络 4~5 次，取其中与平均值误差不超过 10% 的所有闪络电压的算术平均值作为绝缘子串的平均闪络电压。

2.4.4 试验数据的获取方法

试验的数据采集系统由工业 PC 和便携式综合测试仪 Handyscope HS4 组成。HS4 是集示波器、频谱分析仪、瞬态记录仪和电压表于一身的四通道综合性测量仪器，可同时采样四路信号，其采样速率最大 50M 赫兹，电压输入范围 0.2 伏到 80 伏，分辨率从 12 位到 16 位可调。本文试验中选用两个通道，同时测量试品电压和流过的泄漏电流信号。

2.5 本章小结

本章叙述了模拟风沙环境的试验装置、试验方法、测量方法及相关仪器。

3 沙尘环境下瓷绝缘子闪络特性的试验研究

3.1 引言

在外绝缘中，绝缘子是非常重要的且大面积应用的绝缘部件，由于这些绝缘子常年处于外界自然环境中，因此各种自然条件变化、各种气候变化都会对其产生很大的影响，其中最容易对电力系统造成很大危害的是污闪，即由于污秽导致产生的闪络^[46,47]。污秽物附着在绝缘子上的状态一般与气候条件有关，干燥气候环境下绝缘子表面的污秽层由于其电阻很大，对于绝缘子闪络电压的影响不大，但不同污秽物由于介电常数的差异，会导致绝缘子周围环境介质改变，有可能影响其表面电场分布导致其闪络电压的变化；在大气湿度较高的地区，绝缘子上沉降的污秽物会受潮变得湿润，其污层电阻明显下降，电导剧增，导致绝缘子泄漏电流大大增加，因此即使在工作电压下，绝缘子都有可能发生污闪^[46,47]。

沙尘暴是分布范围及其广泛的一种污秽类型，其特点受气候的影响很大，在干燥的北方地区沙尘暴主要呈现出大风速、高浓度的特点；而在南方湿润地区则以浮尘的形态居多。据统计沙尘污秽在绝缘子上的沉积量每年总量可达 $40\text{mg}/\text{cm}^2\sim 50\text{mg}/\text{cm}^2$ ，虽然沙尘是一种难以溶解的弱电解质，但具备一定吸潮能力，使电解质充分溶解增大污层导电率，降低绝缘子的闪络电压。

本章分别在沙尘暴模拟实验室和人工气候室内模拟了不同沙尘气候环境，通过人工模拟试验系统的分析了风沙速度（沙粒不吸附电荷）、沙粒带电量（沙粒吸附正、负电荷）、沙粒沉积量等因素及不同污秽类型对绝缘子交流闪络电压的影响关系，同时测量了污秽受潮后流经绝缘子表面污层的泄漏电流，综合分析绝缘子的污秽闪络特性。

3.2 沙尘环境对瓷绝缘子闪络电压的影响

3.2.1 风速对绝缘子交流闪络电压的影响

根据风速和能见度的不同，沙尘天气一般分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气情况。浮尘和扬沙天气过程对应的风力等级较小，一般不高于4级风力（ $5.5\text{m}/\text{s}\sim 7.9\text{m}/\text{s}$ ），此时沙尘颗粒难以大量跃起，空气中沙尘密度较小。沙尘暴天气过程对应的风力等级一般在4级以上，最高可以到12级。考虑到试验结果的工程意义，本实验安排的风速范围在 $2\text{m}/\text{s}\sim 8\text{m}/\text{s}$ ，对应的是中等沙尘暴及以下等级的沙尘天气，因为8级风力以上的强沙尘暴出现的几率很小，而且对电网的破坏已经不局限于外绝缘方面，可能以力学破坏占主导。图3.1为在有风无沙和有风有沙环境下XP-70瓷绝缘子的交流闪络电压与风速的关系。

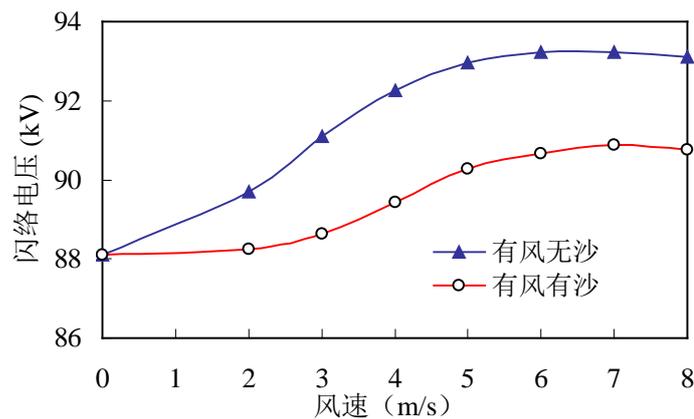


图 3.1 风速与瓷绝缘子交流闪络电压的关系

Fig.3.1 Relationship between flashover voltage of the porcelain insulator and wind velocity

由图 3.1 可以发现,在有风无沙和有风有沙环境下,随着风速的增加,绝缘子的交流闪络电压呈增大趋势,但增大率变缓,有沙时的闪络电压比无沙时低。在风速超过 6m/s 后,绝缘子交流闪络电压受风速的影响有饱和趋势。同时,对比有风的情况和风速为 0 的情况,可以发现,有风时绝缘子闪络电压比风速为 0 时高,风速导致其闪络电压的升高,但升高的幅度逐渐变小。

3.2.2 沙粒电荷量对绝缘子交流闪络电压的影响

沙尘暴发生时,扬起的沙粒彼此之间、沙粒与大地之间都会由于不对称摩擦而带上电荷,形成带电沙粒,这些带电沙粒形成的空间电荷会对输电线路中绝缘子串表面放电产生影响。本文通过实验研究了沙粒带电量对绝缘子交流闪络电压的影响。实验采用固定的风速和沙尘浓度,分别为 6m/s 和 10g/m^3 ,实验结果如图 3.2 所示。

由图 3.2 可以看出,介质环境中出现带电沙粒后绝缘子的交流闪络电压出现下降。当沙粒所带电荷由 $5 \times 10^{-8}\text{C/kg}$ 上升到 $30 \times 10^{-8}\text{C/kg}$ 时,绝缘子闪络电压下降趋势变缓。电荷带正电荷时对绝缘子闪络电压产生的影响较为明显,带来的闪络电压压降略大,最大为 5.45%。

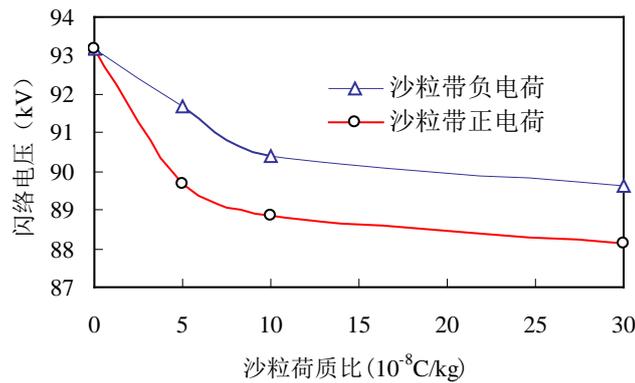


图 3.2 沙粒荷质比与瓷绝缘子交流闪络电压的关系

Fig.3.2 Relationship between flashover voltage of the porcelain insulator and charge-to-mass ratio of sand particles

3.2.3 沙尘沉积量对污秽绝缘子交流闪络电压的影响

南方大部分地区气候较为湿润，使得悬于空气中的污秽颗粒、粉尘等很容易造成户外绝缘子大量积污。同时这些地区在沙尘暴季节多表现为尘雾或浮尘天气，受湿润天气及绝缘子表面污秽物黏着作用，沙尘极易沉降在绝缘子表面。沙尘作为一种不溶性污秽颗粒，其沉积量的变化会对绝缘子闪络特性造成一定影响。根据线路污秽等级的划分标准^[2]，试验中选取了三个污秽等级，对应的等值附盐密度分别为 $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ ，沙尘沉积密度变化梯度设置为 $0\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $6\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ ，对试验结果按最小二乘法进行曲线拟合，如图 3.3 所示，经曲线拟合所得的特征指数等值见表 3.1 所示。

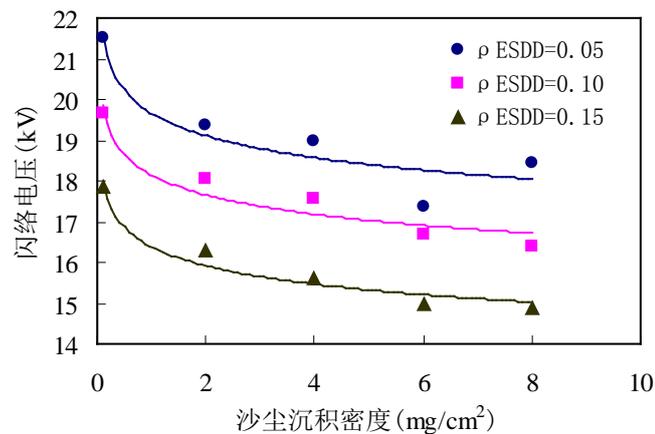


图 3.3 沙尘沉积量与瓷绝缘子闪络电压的关系

Fig.3.3 Relationship between flashover voltage of the porcelain insulators and deposition density of sand particles

由图 3.3 可知,不同盐密下的人工污秽绝缘子表面出现沙尘后,其闪络电压明显低于无沙尘时的闪络电压,且闪络电压均随着沙尘沉积密度的增加而下降。当沙尘沉积密度较小时,绝缘子闪络电压随沉积密度的增加下降较快,随着沙尘沉积密度的进一步增大,闪络电压下降的趋势变缓,这种趋势类似于盐密、灰密(硅藻土)对绝缘子闪络电压的关系。

表 3.1 不同盐密 ρ_{ESDD} 下常数 B 与沉积密度特征指数 b

ρ_{ESDD} mg/cm ²	B	B	R^2
0.05	19.655	0.041	0.883
0.10	18.146	0.039	0.919
0.15	16.379	0.041	0.923

表 3.1 中 B 为与绝缘子形状有关的常数, b 为沙尘沉积密度对闪络电压影响的特征指数, R^2 表示拟合精度。由表 3.1 可知,在不同盐密 ρ_{ESDD} 下,沙尘沉积密度的影响指数 b 分别为 0.041、0.039 和 0.041,其均值为 0.0403,三个 ρ_{ESDD} 下 b 值对其平均值的误差均不超过 5%,在允许误差范围内。如将 b 值精确到两位小数,则三值均为 0.04,即沙尘沉积密度影响指数 b 受 ρ_{ESDD} 的影响不明显,因此也可以认为沙尘对绝缘子闪络电压的影响规律是独立的,这与硅藻土等不溶性污物对绝缘子闪络电压的影响规律一致。

考虑到风沙严重的西北地区输电线路外绝缘设备表面沉积的沙尘一般较多,本节也通过试验研究了沙尘沉积密度较大时绝缘子闪络电压的变化情况,试验结

表 3.2 各沙尘沉积密度下污秽绝缘子闪络电压的试验结果

盐密 (mg/cm ²)	沙尘沉积密度(mg/cm ²)					
	0	10	20	30	40	50
0.05	21.51	18.50	21.60	23.10	25.20	27.63
0.1	19.68	16.30	20.06	20.64	22.50	24.73
0.15	17.87	14.60	18.20	19.10	21.30	23.55

果见表 3.2。由表 3.2 可知,随着沙尘沉积密度的增加,绝缘子闪络电压并非单调变化,在沙尘沉积密度为 10 mg/cm²~20mg/cm² 时绝缘子闪络电压出现拐点,由下降的趋势变为升高,当沉积密度超过 20 mg/cm² 时,其闪络电压甚至高于无沙尘沉积时的闪络电压。这说明在潮湿的气象环境下,少量沙尘沉积在绝缘子上时对绝

缘子绝缘特性的破坏性影响更为严重，尤其是在易发生尘雾天气的气候湿润地区。

3.2.4 不溶性污秽类型对绝缘子交流闪络电压的影响

户外绝缘子表面沉降的污秽物质由可溶于水的导电物质和不溶于水的惰性物质组成。可溶性污秽物用等值附盐密度(ρ_{ESDD})表征，研究中一般用适量的 NaCl 来表示，经过大量的试验研究和机理分析后已应用于电力系统污秽等级划分的制定标准中；不可溶性污秽物用灰密(ρ_{NSDD})表征，对不可溶性污物的早期研究中只作了一定范围的规定，忽略了灰密的变化对绝缘子串闪络特性的影响，近来的研究表明染污绝缘子的污闪电压不仅受沉积密度的影响，还受不溶性污秽的种类的影响，但在相关标准的制定中并没给出不溶性污秽物种类的不同对污闪电压影响的具体差异^[47]。

我国西北等风沙较大的地区在污秽等级划分中建议用硅藻土或高岭土来模拟沙尘颗粒等不溶性污秽物，然而各种污秽物种类在化学组成上存在巨大差异，表 3.3 给出了高岭土、硅藻土和沙尘颗粒的化学组成成分以及所含比重^[47]。文献[47]研究了硅藻土和高岭土的化学成分：高岭土是一种硅酸盐粘土矿物质，主要成分高岭石中的羟基具有亲水性；硅藻土易吸水，它除表面吸水外，水分子还可以与其表面的氢键键合；但是硅藻土组分中 SiO_2 的含量大于高岭土，而 SiO_2 具有憎水性，所以高岭土比硅藻土更容易吸附水分，且高岭土具有典型的层状 Si-O 四面体结构，具有较大的粘度，溶入液相后粘度大幅度增加，可以更好的在绝缘子表面粘附水分。沙尘颗粒的主要组成为 SiO_2 ，除了 Si、Al、Fe 等元素外还含有大量的 K、Na、Mg、Ca、及 Cu 等化学元素，此外沙尘颗粒在粒径、颗粒形状上均与硅

表 3.3 各种不溶性污秽物的主要成分特性

不溶污秽物种类	重量组成 (%)			
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	H_2O
高岭土	40~50	30~40	0.3~2	7~14
硅藻土	70~90	5~25	0.5~6	7~14
沙尘颗粒	69~73	13.5~16	0.3~4.3	6~12

藻土、高岭土有所差异，因此有必要对沙尘、硅藻土这两种不溶性污秽物进行大量的人工污秽对比试验，研究两者在污秽试验结果上的差异，为我国西北等风沙较大的地区在污秽等级划分上提供更准确的参考信息。

本节分别通过人工模拟试验比较研究了硅藻土和沙尘颗粒对绝缘子闪络电压的影响。 ρ_{ESDD} 浓度梯度设置为 $0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 及 $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ ，每个污秽

度下选择 3 片绝缘子试品试验，每片试品闪络 3 次，取其中与平均值误差不超过 10% 的所有闪络电压的平均值为该污秽度下的平均闪络电压。试验研究如表 3.4 所示，试验得到的闪络电压的标准偏差在 5% 以内。分别对表 3.4 中各个污秽浓度下的绝缘子闪络电压进行曲线拟合，可以得到同一 ρ_{ESDD} 下闪络电压与沙尘颗粒、硅藻土沉积密度的关系，如图 3.4、图 3.5 和图 3.6 所示。

表 3.4 不溶物类型对瓷绝缘子交流闪络电压的影响

Table 3.4 Influence of kinds of insoluble pollution materials on AC flashover voltage

ρ_{ESDD} (mg/cm^2)	沉积密度 (mg/cm^2)	硅藻土		沙尘颗粒		U_{f1}/U_{f2}
		闪络电压 $U_{f1}(\text{kV})$	标准偏差 ($\sigma\%$)	闪络电压 $U_{f2}(\text{kV})$	标准偏差 ($\sigma\%$)	
0.05	0	21.51	3.2	21.51	3.2	1
	2	18.88	2.8	19.36	3.4	0.98
	4	18.11	3.7	19.16	2.7	0.95
	6	17.53	2.6	18.72	2.9	0.94
	8	17.02	2.9	18.58	3.1	0.92
0.1	0	19.38	3.6	19.38	3.6	1
	2	17.03	3.9	18.04	2.9	0.94
	4	16.11	2.9	17.58	2.8	0.93
	6	15.58	3.3	16.67	3.2	0.93
	8	15.10	2.8	16.38	3.1	0.92
0.15	0	16.87	3.2	16.87	3.2	1
	2	15.02	4.1	16.31	3.7	0.92
	4	13.68	3.9	15.6	3.0	0.88
	6	13.12	3.4	14.98	2.7	0.88
	8	12.68	3.1	14.88	2.9	0.85

由表 3.4 可知，不同 ρ_{ESDD} 下 XP-70 瓷绝缘子的闪络电压均随着硅藻土沉积密度的增加而下降，并且当沉积密度较小时，随着沉积密度的增加闪络电压下降较快，随着沉积密度的继续增加，闪络电压下降的趋势变缓，例如在 $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，当沉积密度从 0 增加到 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ ，即沉积密度只增加了 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ ，但是闪络电压却下降了 2.63kV ；当沉积密度从 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 上升到 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ ，沉积密度增加了 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ ，闪络电压却值下降了 1.09kV 。XP-70 瓷绝缘子上沉积沙粒时，存在类

似的变化规律，在 $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，当沉积密度从 0 增加到 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ ，即沉积密度只增加了 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ ，但是闪络电压却下降了 2.15kV ；当沉积密度从 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 上升到 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ ，沉积密度增加了 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ ，闪络电压却值下降了 0.58kV 。

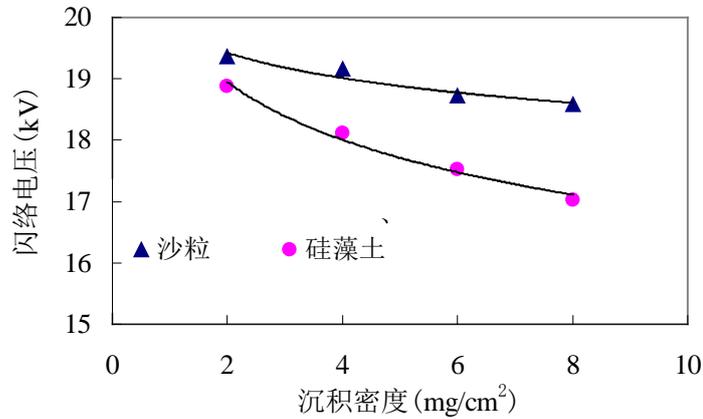


图 3.4 $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 时绝缘子闪络电压与沉积密度的关系

Fig.3.4 Relationship between flashover voltage of insulators and deposited density with $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$

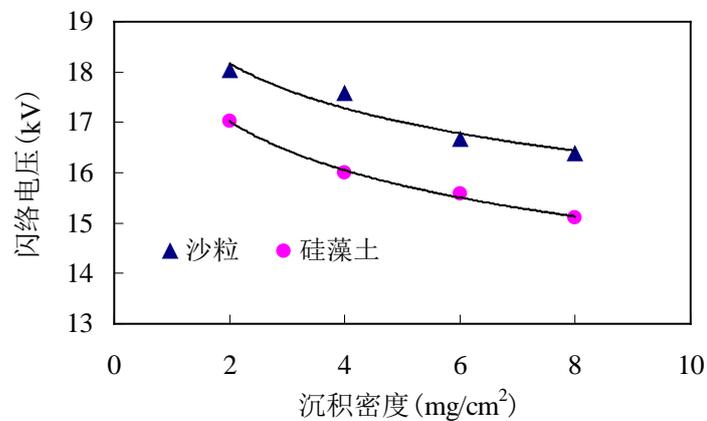


图 3.5 $\rho_{ESDD}=0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 时绝缘子闪络电压与沉积密度的关系

Fig.3.5 Relationship between flashover voltage of insulators and deposited density with $\rho_{ESDD}=0.10\text{mg}/\text{cm}^2$

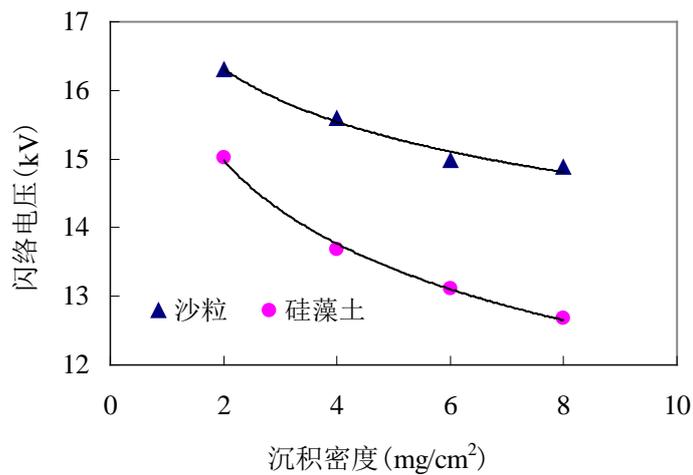


图 3.6 $\rho_{ESDD}=0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ 时绝缘子闪络电压与沉积密度的关系

Fig.3.6 Relationship between flashover voltage of insulators and deposited density with $\rho_{ESDD}=0.15\text{mg}/\text{cm}^2$

由图 3.4、图 3.5 和图 3.6 可以发现，在同一污秽度下，不溶物类型为硅藻土和沙尘颗粒时，绝缘子污闪电压随着沉积密度的增加的变化趋势一致，并且相对于硅藻土这种不溶性污秽物，沙尘颗粒对绝缘子污闪电压的影响较小，因此在同等污秽浓度下，对地处我国西北等风沙较大的地区，按照硅藻土代替沙尘颗粒模拟绝缘子表面不溶性污秽物制定相关污闪电压标准是安全的。

3.3 沙尘沉积下污秽绝缘子泄漏电流分析

泄漏电流是在高电压作用下流过潮湿的污秽绝缘子表面的电流，它是气候，电压，污秽三个主要因素综合反映和最终作用的结果，是反映绝缘子污秽闪络特性的动态参数，是被认为最能反应污秽度的一个科学的参数。

风沙环境中空气湿度很低，尽管施加的电压不断增大，但流经绝缘子表面的泄漏电流幅值非常小，几乎测不到流经绝缘子表面的泄漏电流，在绝缘子发生闪络时，泄漏电流才突然增大，如图 3.7 所示的绝缘子在风沙环境下干闪络时的作用电压、泄漏电流波形，因此在干燥气候条件下，泄漏电流的变化对于观察绝缘子的运行状态意义较小。但是绝缘子在受潮环境下流经其表面的泄漏电流幅值会随着施加电压的增大而出现明显的变化，如图 3.8 所示。因此，本文重点分析了沙尘沉积下流过污秽绝缘子表面的泄漏电流的变化情况。

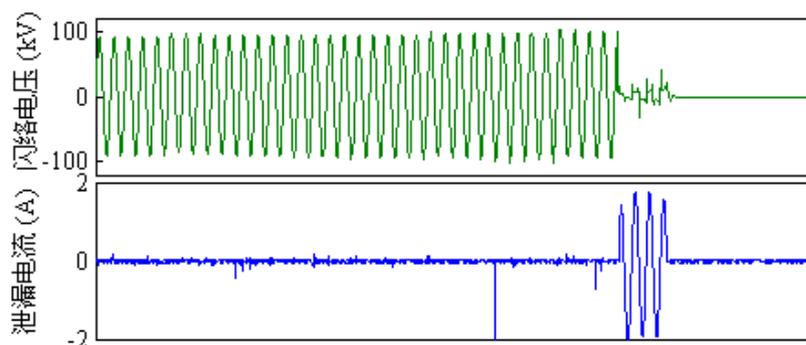


图 3.7 污秽绝缘子干闪络时作用电压、泄漏电流波形

Fig.3.7 Voltage and leakage current during the dry flashover process of polluted insulator

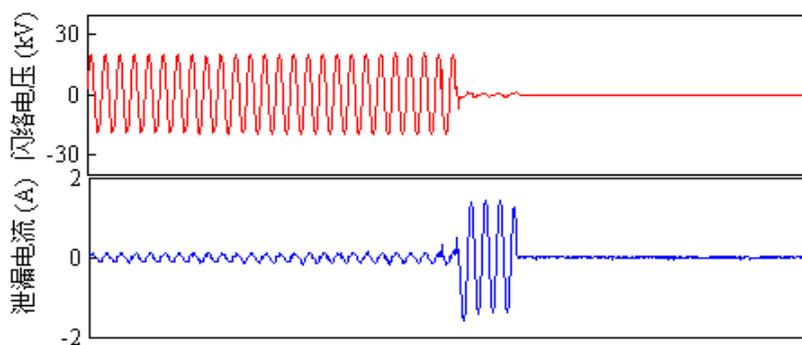


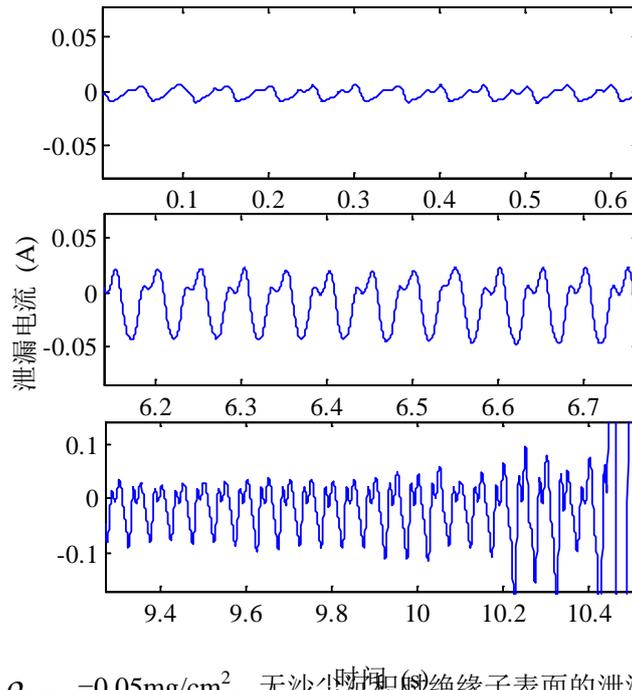
图 3.8 污秽绝缘子湿闪络时作用电压、泄漏电流波形

Fig.3.8 Voltage and leakage current during the wet flashover process of polluted insulator

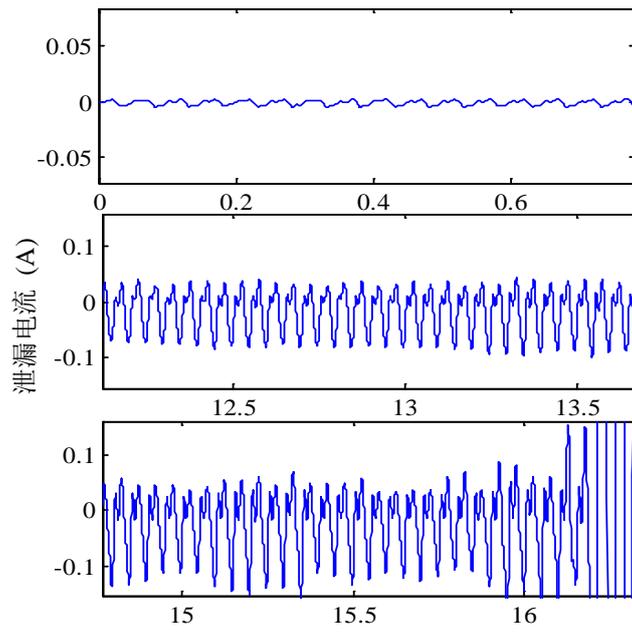
文献[48]发现,采集的原始信号中含有大量强烈的干扰噪声,不经消噪处理则无法辨识所需的泄漏电流信号。经有源低通滤波器将频率截至 10kHz 后,信号中的高频干扰和噪声信号可得到有效的抑制,但是模拟低通滤波器并非理想滤波器,只能减小高频截至频率附近的高频分量,但无法完全滤除干扰信号。采用数字滤波技术可以很好的解决这一难题,经截至频率为 1kHz Butterworth 滤波器滤波后的泄漏电流信号,可以很清晰的看到泄漏电流中的“零休”现象。因此,本章节所有泄漏电流原始数据均采用 Butterworth 滤波器滤波,滤除 10kHz 以上的高频干扰噪声信号。

3.3.1 沙尘沉积量对泄漏电流工频分量的影响

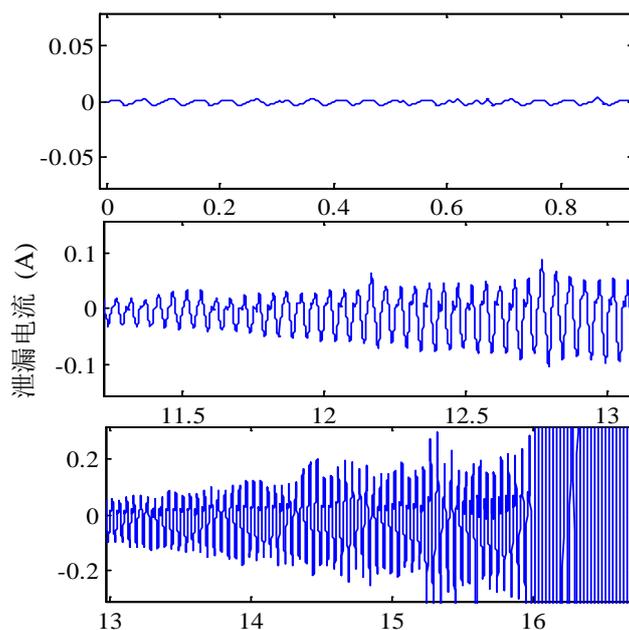
泄漏电流工频分量是能最直接反映试品表面污层电阻的特征量,能够表征绝缘设备的总体绝缘水平,它的大小与绝缘设备表面有效电阻、受潮状态有关。分析泄漏电流的工频分量可以反映绝缘设备污层的湿润程度。图 3.9(a)、(b)、(c)为无沙尘沉积、相对少量沙尘沉积和相对较多沙尘沉积时流经污秽绝缘子上表面的泄漏电流。



(a) $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、无沙尘沉积时绝缘子表面的泄漏电流变化



(b) $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、沙尘沉积密度为 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 时绝缘子表面的泄漏电流变化



(c) $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ 、沙尘沉积密度为 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ 时绝缘子表面的泄漏电流变化

图 3.9 污秽绝缘子泄漏电流工频分量变化图

Fig.3.9 Conductive component of leakage current of polluted insulator

从三组试验的对比结果中可以看出：在施加电压的初期，污秽绝缘子表面泄漏电流的工频分量均值较小，约为 $10\text{mA}\sim 15\text{mA}$ ；随着施加电压的升高，当绝缘子表面有局部电弧时，泄漏电流的幅值有明显变化，无沙尘沉积时泄漏电流幅值在 $30\text{mA}\sim 40\text{mA}$ 间变化，沙尘沉积密度为 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 时其幅值处于 $50\text{mA}\sim 60\text{mA}$ 间，沙尘沉积密度为 $8\text{mg}/\text{cm}^2$ 时其幅值处于 $80\text{mA}\sim 90\text{mA}$ 间；当污秽绝缘子表面出现大量局部电弧、即将闪络时，泄漏电流幅值大幅上升，对应三种试验条件下，其幅值分别高达 100mA 、 150mA 、 200mA 。浸润理论认为污秽物中的不溶性污物可吸附水分，形成一层水膜，导致可溶性污秽溶于水分中，在绝缘子表面形成导电通道，从而有泄漏电流流过。在一定范围内，随着不溶性污物的增多，其吸附的水分也越多，相应的会溶解更多的可溶性污物，增大水膜的导电率，泄漏电流也会增大。由此可见，随着沙尘沉积在污秽绝缘子表面，沙尘颗粒会吸附空气中的水分，在绝缘子表面形成水膜，增大了污层的导电率。

由图 3.9 发现，泄漏电流在发展过程中其幅值并非单调增大的，而是处于局部幅值下降、整体幅值升高的复杂过程。这是由于绝缘子表面各处的电流密度不全相同，在电流密度较大的地方，产生的焦耳热的烘烤作用会使该处的水分蒸发形成干燥区，造成该区域的有效电阻增大，较大的表面电阻又抑制了泄漏电流，沿绝缘子表面的电压分布也产生相关变化。此时加在绝缘子上的电压主要由干燥区

域承受，当干区承受的电场强度超过空气放电的临界场强时，该区域就会产生局部放电。局部放电是不稳定的，处于熄灭、重燃的重复过程，在泄漏电流上呈间歇的脉冲状态，见图 3.10 所示。泄漏电流被干区的高电阻限制到较小的值后，其烘干作用降低，大气的湿气会使这部分干区重新湿润，同时有新的干区形成，且伴随着局部放电。正是这种局部区域被烘干又吸收湿气再湿润的重复过程造成泄漏电流的不稳定变化。

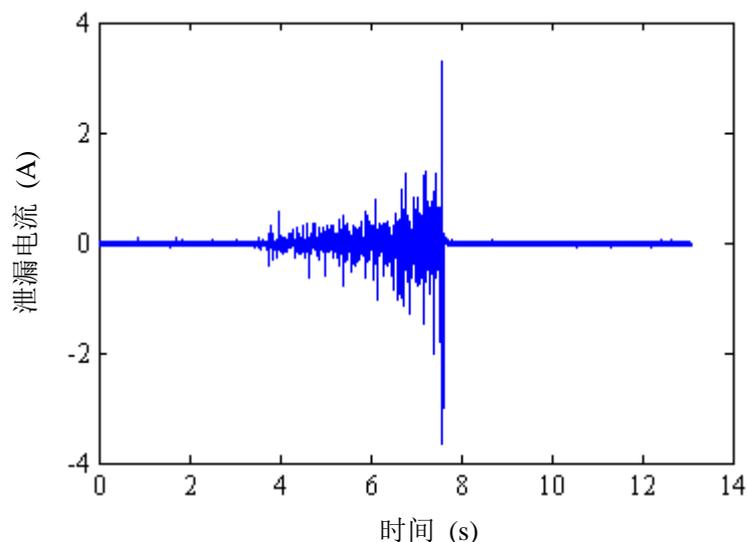


图 3.10 泄漏电流原始信号

Fig.3.10 Original signal of leakage current

3.3.2 沙尘沉积量对泄漏电流谐波特性的影响

泄漏电流的时域波形为正弦型，由基波成分、三次五次等各次谐波成分和衰减直流成分等组成，时域波形幅值的大小主要由基波幅值决定；由于污秽绝缘子表面出现电弧后，伴随着电弧的熄灭和重燃，高次谐波在波形中占据的比例会升高，其中又以三次谐波为主。谐波的变化在频域范围内反映了泄漏电流的变化情况，文献[49,50]的试验结果表明随着盐密的增大，三次谐波分量幅值可增大数十倍，三次谐波与基波幅值之比也成指数函数规律增长，并提出以泄漏电流基波、三次谐波、五次谐波分量的幅值以及泄漏电流三次谐波与基波的幅值之比来作为判断绝缘子染污程度的判据。泄漏电流与闪络电压及污秽物质密切相关，研究表明灰密对闪络电压的影响关系同于盐密，但灰密对泄漏电流各个谐波变量的影响关系是否与盐密对其影响规律，有待研究。

对试验过程中记录了泄漏电流波形进行 FFT 变换，在频域范围观察三次谐波的变化，得到盐密为 $0.15\text{mg}/\text{cm}^2$ ，无沙尘沉积、沙尘沉积密度为 $2\text{mg}/\text{cm}^2$ 、 $4\text{mg}/\text{cm}^2$ 、

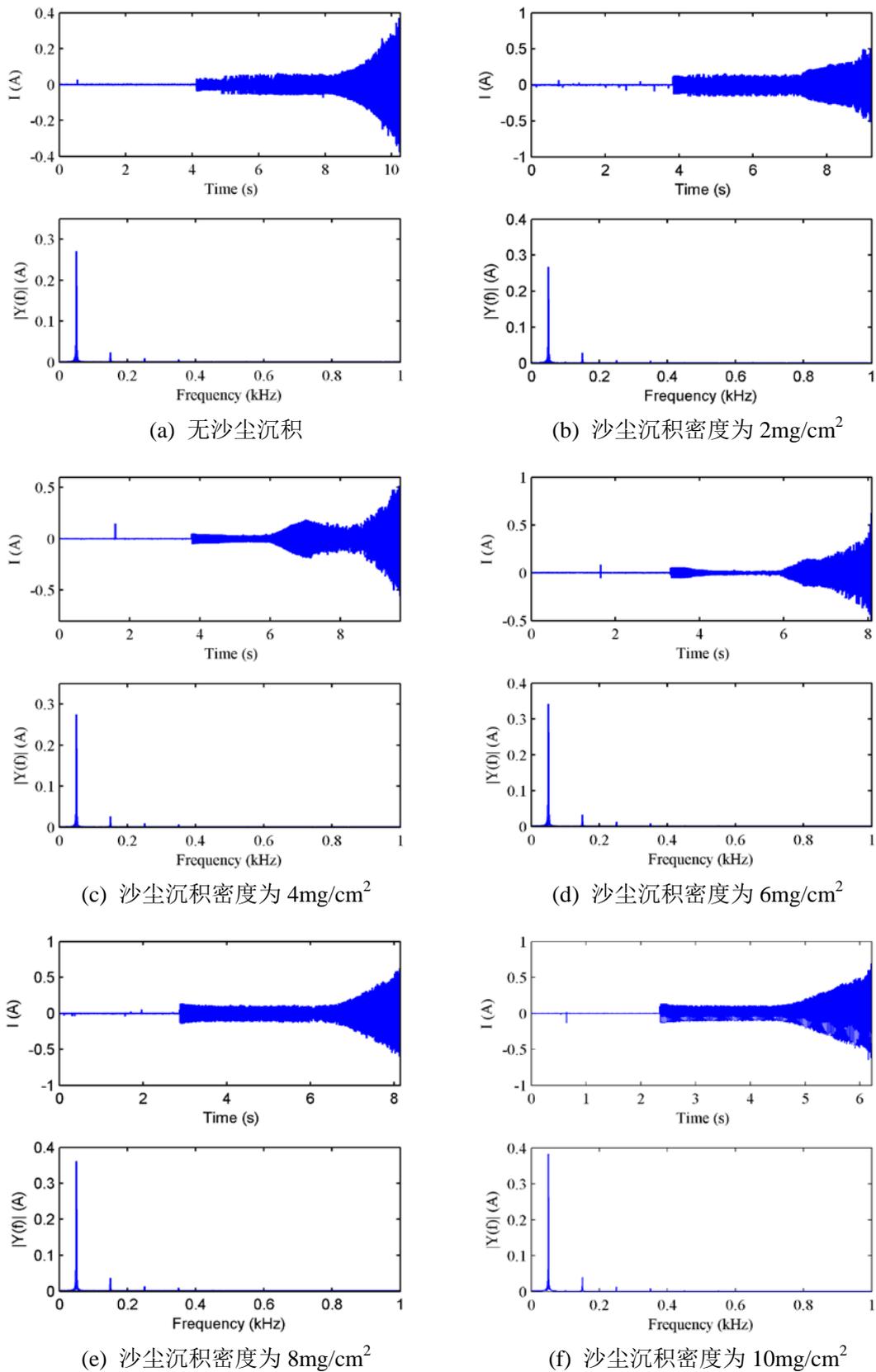


图 3.11 固定盐密为 $0.15 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、不同沙尘沉积密度时泄漏电流时频域波形

Fig.3.11 Leakage currents with identical ρ_{ESDD} and changed sand deposited density

6mg/cm²、8mg/cm²、10 mg/cm²时泄漏电流的时、频域波形，如图 3.11 所示，其中(a~f)分别对应沙尘沉积密度由小到大时波形的变化情况。

由于泄漏电流的谐波分量以三次谐波和五次谐波为主，其他高次谐波分量的比例非常低，因此经 FFT 变换将泄漏电流在时域内的信号转换到频域时，忽略了五次谐波以上的高次谐波分量，各次谐波分量幅值的变化见图 3.12 所示。由图 3.11(a~f)、图 3.12 可以发现，随着沉积密度的增大，泄漏电流的基波分量的幅值变化较明显，最大可增长 90mA，三次谐波略有变化，而五次谐波几乎未发生变化。随着沙尘沉积密度的变化，泄漏电流中各次谐波分量的变化规律明显不同于其受盐密影响时的变化规律，其原因在于两种污秽物对绝缘子产生影响的本质不同：盐密的变化使污层中导电物质的浓度增大，增大了污层的电导率，使得局部电导上升，该区域更容易在泄漏电流的烘干作用下变成干燥带，进而易于出现局部电弧，正是局部电弧的发生、熄灭、重燃现象产生的各次谐波畸变了电流波形，增大了谐波分量的比例；而不溶性污物是通过吸附大气中的水分在污层表面形成一层水膜来溶解可溶性污物，进而增大污层的电导率，显然沙尘颗粒改变污层电导率的能力远弱于盐密，因此沙尘沉积密度的变化对泄漏电流中各次谐波分量的影响较小，导致各高次谐波分量的变化也较小。

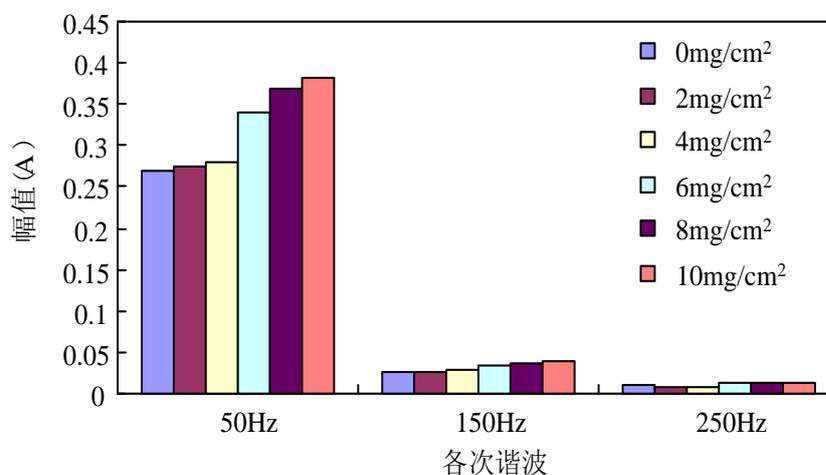


图 3.12 各次谐波幅值与沙粒沉积密度的关系

Fig.3.12 Relationship between each harmonic amplitude and deposition density of sand particles

3.4 本章小结

本章通过人工模拟试验研究了沙尘环境中各个因素对绝缘子闪络电压的影响规律，研究结果表明：

①风沙环境中绝缘子闪络电压随风速的升高而增大，有风有沙时绝缘子的闪络电压比有风无沙时略低，但都比无风无沙环境下的闪络电压高；

②沙粒带上电荷后会降低绝缘子的闪络电压，且沙粒带电量越大，绝缘子闪络电压下降越明显；沙粒带正电荷时对绝缘子闪络电压的影响更明显；

③沙尘沉积在绝缘子表面后对其闪络电压产生的影响与盐密无关，是独立的变量因素；其对闪络电压的影响规律与沉积密度有关，当沙尘沉积密度小于 $10\text{mg}/\text{cm}^2$ 时，会降低绝缘子闪络电压，但是随着沉积密度的进一步增大，沉积的沙尘会对绝缘子放电产生阻碍作用，反而使闪络电压略有上升；

④通过对硅藻土、沙粒两种不溶性污秽物对瓷绝缘子的闪络电压的影响作用一致，在少量污秽沉积的情况下按照硅藻土模拟绝缘子表面不溶性污秽物制定相关污闪电压标准是安全的；

⑤对沙尘沉积环境下流经污秽绝缘子表面的泄漏电流进行分析，发现泄漏电流工频分量幅值随着沙尘沉积密度的增加有增大趋势，表明沙尘颗粒有一定的吸水能力；泄漏电流的三次、五次谐波分量受沙尘沉积的影响非常小。

4 试验条件下瓷绝缘子沿面电场仿真

对于外绝缘而言，沙尘暴环境带来的严重影响之一为可改变周围介质环境，沙尘(暴)气候下环境介质会由原来的较纯净空气介质变为高组分含量、高流速、较长持续时间的气固混合流体，外绝缘设备的工作环境将会发生很大转变。已有研究表明：周围介质特性以及分布对电场分布影响明显，可以加剧电晕放电，或引发电弧放电^[51-53]；空气—沙尘混和流体和空气介质相比，具有较高的电导率和较大的介电常数^[24]，使得气隙放电电压降低^[54,55]；混和流体在长时间高速运动摩擦下会导致带电粒子的聚集，产生空间电场^[5]。基于已有的研究可以推断，沙尘环境下原有电场分布会发生畸变，放电进程会被加剧，外绝缘特性有下降趋势，因此本章节采用COMSOL Multiphysics仿真软件仿真计算试验条件下XP-70瓷绝缘子表面电场的分布情况，从电场的角度分析风沙环境对绝缘子闪络特性的影响，为进一步研究沙尘环境下绝缘子闪络机理提供参考。

4.1 沙尘环境下瓷绝缘子电场计算模型

4.1.1 有限元法电场计算基本原理

有限元法计算电场是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法，类似于有限差分法求解边值问题的处理方法。它将待求解的电场问题利用变分原理转化为相应的变分问题，即找出微分方程对应的泛函，从而转变为泛函的极值问题求解，然后利用剖分插值将变分问题离散化为普通多元函数的极值问题，最终归结为一组多元的代数方程组，解之即可获得电场问题的数值解。

应用有限元法求解变分问题主要步骤如下^[56]：

①针对实际问题，进行必要的简化，保留主要的、本质的东西，忽略次要的、枝节的因素，确定求解区域，划分求解区域中的媒质，形成物理模型；

②针对该物理模型，构建数学控制方程和描述媒质电磁特性的构成方程，建立合适的边界条件和媒质分界面衔接条件，建立相应的边值问题，并转化为等价的变分问题；

③将所求解的场域剖分成有限个网格(即单元)，设有 Z_0 个单元，得到许多离散点(称为节点)，设有 N_0 个节点可在单元的顶点，亦可在单元的边界上取得，每个节点对应有唯一的待求电位函数值，于是，全域上的泛函 $F(u)$ 为各单元上泛函 $F_e(u)$ 之和：

$$F(u) = \sum_{e=1}^{Z_0} F_e(u) \quad (4.1)$$

④在每个单元之内选取基函数，设近似函数在单元内各节点的待求函数值之间随坐标按某种确定的函数关系变化。例如在某单元中有 n_0 个节点，规定近似函数 u 在待求函数各单元节点上的值 $u_i (i=1,2,\dots,n_0)$ 之间随坐标按某种函数关系变化，该近似函数又称为待求函数的(内)插值函数，即：

$$u \approx \tilde{u} = \sum_{i=1}^{n_0} a_i u_i \quad (4.2)$$

以近似反映待求函数 u 在单元中的分布情况；

⑤将插值函数代入各单元泛函中，使单元上的泛函近似地被以单元各节点待求函数值为自变量的能量函数所代替，称为连续泛函离散化，从而使全域上总的能量泛函近似由所有节点待求函数值为自变量的能量多元函数所代替：

$$F(u) \approx F(\tilde{u}) = F(u_i) \quad (i=1,2,\dots, n_0) \quad (4.3)$$

⑥按多元函数的极值原理，将能量函数对自变量 u_i 求极值，得到一系列的代数方程：

$$\frac{\partial F(u_i)}{\partial u_i} = 0 \quad (i=1,2,\dots,n_0) \quad (4.4)$$

联立以上 n_0 个代数方程→代数方程组→有限元方程。求解该方程组，获得求解场域中各节点处待求函数值的近似解(又称它为离散解)。

4.1.2 COMSOL Multiphysics 软件介绍

COMSOL Multiphysics 是一款高级数值仿真软件，被称为“第一款真正的任意多物理场直接耦合分析软件”，适用于模拟科学和工程领域的各种物理过程。COMSOL Multiphysics 以其高效的计算性能和杰出的多场直接耦合分析能力实现了任意多物理场的高度精确的数值仿真，在全球领先的数值仿真领域里得到广泛的应用。

COMSOL Multiphysics 的如下特点使得其在有限元分析软件中具有领先地位：

①具有极强的易学易用性：既可以进行单一场域问题的求解，也可以求解多场及多场耦合问题，该软件可以自动建立多物理场耦合、多维度/多尺度的耦合以及智能导入实验记过进行耦合；由于其采用基于模型树的流程化操作界面，提供多语种选择，方便了用户进行载荷条件选取、边界条件设定、求解域参数的设置，提高用户的建模分析效率；具有完全开放的构架，在图形界面中轻松修改、添加控制方程，或定义专业所需的偏微分方程；提供专业的动态帮助系统和在线帮助文档，而且用户可根据软件自带的操作手册学习掌握软件的操作和应用。

②具有开放的操作平台：提供海量的计算模型库，内置各种常用的物理模型，用户既可以直接应用，也可以对其进行必要的修改；内嵌丰富的 CAD 建模工具，方便用户直接进行二维、三维建模，还支持全面导入主流 CAD 文件或双向同步建

模。

③具有灵活的软件兼容性：可以与常用的 MATLAB、CAD 等专业软件进行无缝链接，提供强大的二次开发功能；可利用基于 JAVA 标准的 API 构建自己的有限元软件。

④强大的数据处理能力：具有强劲的网络剖分能力，支持自动或手动进行结构化、非结构化网格剖分，支持自适应网格、移动网格功能；支持 Windows、Linux 和 Unix 系统的 32、64 位处理能力和并行计算，支持自动保存和恢复；丰富的后处理功能，用户可根据需要进行各种数据、曲线、图片及动画的输出与分析。

运用 COMSOL Multiphysics 软件计算仿真过程主要包括如下步骤^[57]：

①几何建模

COMSOL Multiphysics 软件内建的 CAD 工具不仅可以方便的创建各种常见维度的点、线、面及实体，将二维几何拉伸或旋转成三维对象，通过复杂的布尔运算组合几何体，还可以在图形界面下实现一些参数化得几何建模；此外也可以导入 CAD 等其它软件创建的物理模型，并且具有对所导入的模型进行智能修复的功能，可对进行必要的修正，以加强仿真精度。

②定义参数

软件提供了多达 2500 种标准的材料、27 种材料属性的材料库，还可以从 MartWeb 下载导入以扩展其材料库。电磁场领域求解所需的导电率、介电常数等参量均涵盖在内，在定义模型的物理参数时只需从材料库中查找或导入材料属性便可对变量进行简单的设置。参数可以是各向同性、各向异性的，也可以是模型变量、空间坐标和时间的函数。

③划分网格

COMSOL Multiphysics 的网格生成器可以划分三角形、四边形、四面体、棱柱等结构化、非结构化网格单元。根据研究需要可选择手动剖分、自动剖分的方式，以及边界层网格、映射网格、自由网格等多种网格剖分器。经验表明物理场自动剖分网格功能可以节约前处理的时间和资源，且能得到高质量的网格。

④求解

COMSOL Multiphysics 的求解器是基于 C++ 程序并采用最新的数值计算技术编写而成，提供大量的功能强大求解器，包括直接式求解器、迭代式求解器、并行式求解器等。根据精度要求，可以设定不同的容差，在最短的时间内得到满足要求的结果。

⑤后处理

所有场变量和其它特殊应用参数的人工交互式图形处理；求解运算参数在求解过程中的在线图形显示；使用 OpenGL 硬件加速的高效图形处理；使用 AVI 和

QuickTime 文件进行动画模拟；边界和子域的集成；横截面和部分模型的图形结果处理。

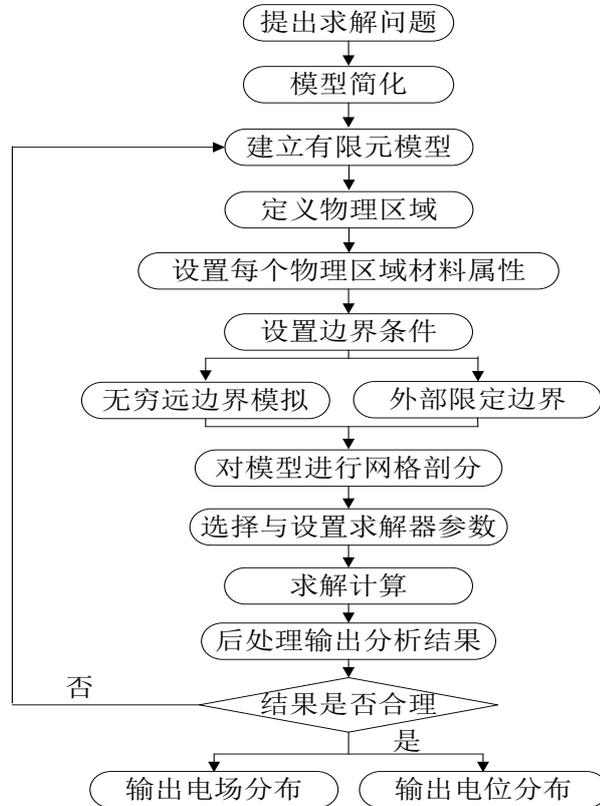


图 4.1 Comsol 软件电场仿真计算流程图

Fig.4.1 Flow chart of electric field simulation with Comsol software

4.1.3 瓷绝缘子电场仿真模型的建立及其参数设置

COMSOL Multiphysics 4.1 内嵌的 AC/DC 模块是处理稳态、瞬态、时谐问题应用模式的集合，适用于广泛类型的电磁学二维、三维问题的仿真。本文在建立沙尘环境下绝缘子的电场模型时，忽略了穿墙套管及导线对绝缘子表面电场分布的影响；同时，为了便于研究，沉降在绝缘子上的沙尘视为是均匀厚度的平铺在绝缘子表面，因此，沙尘沉积时绝缘子的电场分布模型可视为轴对称模型，其场域内各处的电位只是 (r, z) 的函数，而与 φ 无关，可以用二维轴对称电场求解方法对其电场分布进行求解。而对于风沙环境下的绝缘子仿真模型同样采用二维轴对称模型时，将会在绝缘子周围形成一个带状沙环，考虑到实际沙粒在空间的分散状态，此时的电场分布模型应该采用三维模型，其计算分析才会更准确。基于此，本文分别建立了二维轴对称场模型和三维模型仿真分析不同环境下绝缘子沿面电场分布。同时，本文是在试验条件下进行绝缘子沿面电场仿真，仿真模型采用单片瓷绝缘子 XP-70，设置绝缘子的钢脚、钢帽分别为高压端和接地端，因此不存在悬浮

导体的问题。

利用有限元法求解电场分布时，求解区域必须是个有界闭域，本文在开场域问题的边界条件的处理中采用矩形人工渐近边界条件，边界设定为零电荷/对称。文[57-59]对矩形人工渐近边界条件在轴对称无界高压电场计算中的应用作了详细的论述，证明采用人工渐进边界条件后，仿真结果具有较高的精度。

文[60]对于沙粒的介电常数有所测定，测定结果表明用不同地区的沙样测量出的介电常数略有不同，因此，为了准确设定所采用沙样的介电常数，本文从试验所用的沙样中选取少量沙粒经宽频介电频谱分析仪测量，测量结果表明，沙粒的介电常数受温度影响比较明显，沙样温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$ 变化时，其介电常数在 $3.5 \sim 3.8$ 变化。本文采用室温下测得的沙样介电常数 3.5。同时，为了使仿真条件与实际试验条件相接近，参照文[57]所建立的仿真计算模型对相关参数进行设置，XP-70 瓷绝缘子结构参数见表 2.1，电场计算模型中各部分的基本参数见表 4.1。

表 4.1 电场计算模型的基本参数

Table4.1 Basic parameter of

物理介质	相对介电常数
空气	1.006
沙粒	3.5
金属	8000
瓷体	4.2

本文采用在仿真软件中通过定义函数的方式仿真模拟“沙粒—空气—沙粒”这种混合介质环境，将绝缘子周围的空气环境均匀分为 10^5 个点，再从这 10^5 个点中随机的选取 $N(20000 \sim 50000)$ 个点设置为沙粒的介电常数 3.5，其余各点均设置为空气的介电常数 1.006，其中 N 取值的变化即可表示绝缘子周围沙粒浓度的不同， N 取值为 20000 时表示风沙浓度较小， N 取值 50000 表示风沙浓度较大。

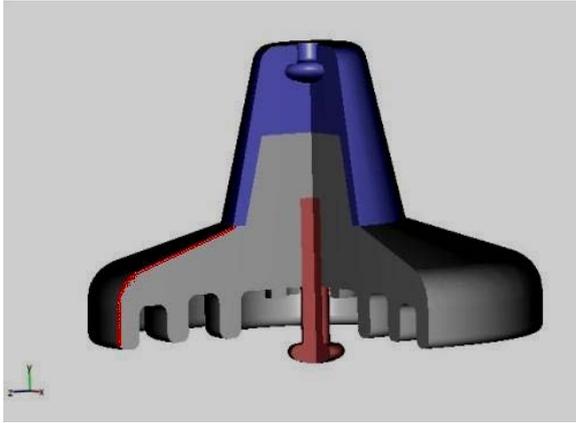


图 4.2 扬沙环境瓷绝缘子三维仿真模型
Fig.4.2 3-D simulation model of porcelain insulator with wind sand environment

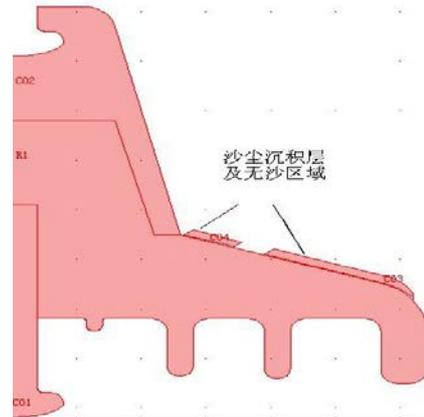


图 4.3 沉沙环境下瓷绝缘子二维轴对称仿真模型
Fig.4.3 2-D axial symmetry simulation model of porcelain insulator with sand particles deposited

4.2 电场仿真计算结果及分析

4.2.1 风沙环境对瓷绝缘子电场分布的影响

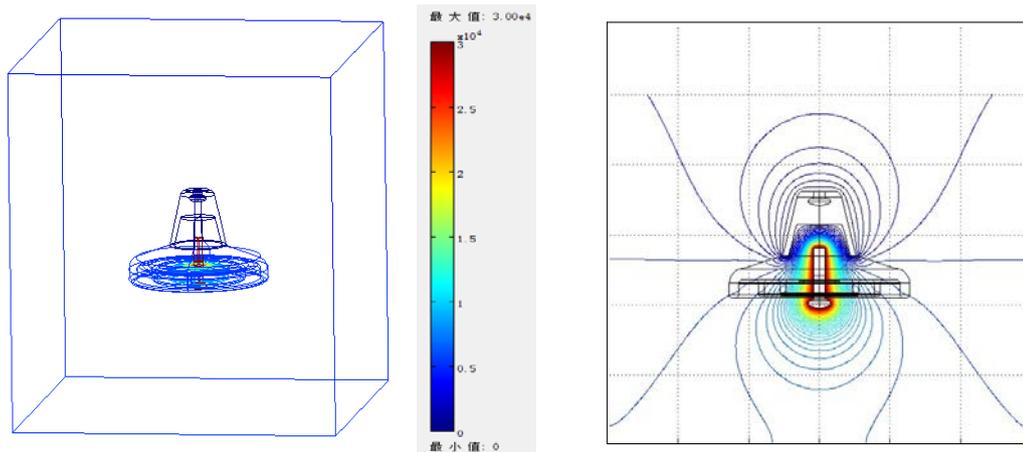


图 4.4 清洁瓷绝缘子电位分布

Fig.4.4 Potential distribution of clean porcelain insulator

图 4.4 是外加电压为 30kV 时整个求解域内电位分布图，由图 4.4 可知：清洁情况下瓷绝缘子表面电位分布十分不均匀，高压端附近的电位远远高于绝缘体上的电位，绝缘体下表面靠近钢脚区的伞裙区域电位高于上表面的区域的电位。对绝缘子附近的电场进行计算，最大电场强度出现在绝缘子钢脚附近，其值为 14.89 kV/cm，电场强度随绝缘子盘径径向距离增大而降低，在最外层伞群附近，电场强度仅有 0.15 kV/cm。

风沙环境下绝缘子沿面电场分布既与沙粒的性质有关，也受沙粒浓度的影响，因此仿真分析时将空间环境中的沙粒浓度设置为浓度较小和浓度较大两种情况，

研究沙粒浓度的变化会对绝缘子电场分布、电场强度产生何种影响。仿真结果表明空间介质中出现沙尘颗粒后，绝缘子周围空间电位分布同清洁环境相比，未出现明显变化，且最大电场强度仍为 14.89 kV/cm ，但最外层伞群附近空间介质的电场强度增大了 0.08 kV/cm 。这说明沙尘颗粒出现后，求解域内空间电场分布发生了较小的变化。因此，对绝缘子沿面电位分布、电场分布进行了仿真计算，如图 4.5、图 4.6 所示。图 4.6 中横坐标表示绝缘体上表面由钢帽到钢脚沿面泄漏距离，如图 4.2 中红色实线所标示。

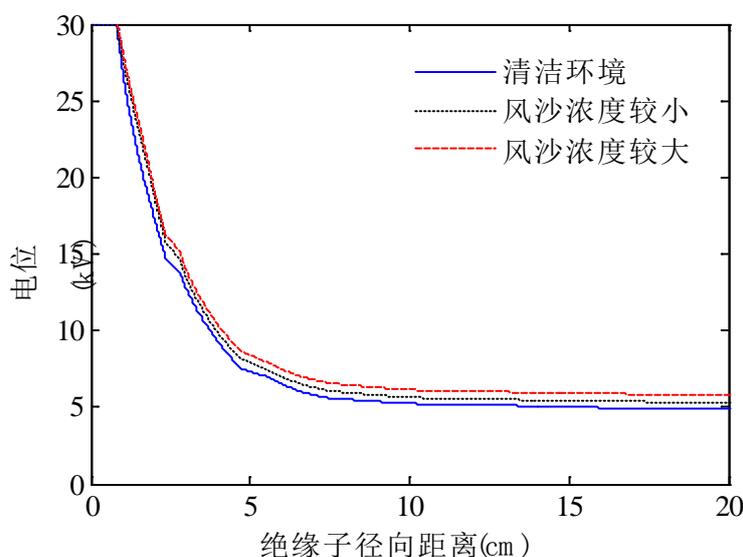


图 4.5 风沙环境下瓷绝缘子径向电位分布

Fig.4.5 Potential distribution of porcelain insulator with wind sand environment

图 4.5 表示绝缘子附近空间介质中随径向距离变化的电位分布，在径向距离小于 1 cm 范围内的电位为钢脚上承受的电压，即为外部作用电压 30 kV ，因此有无风沙时其值不变。空间环境介质承受的电位随着径向距离的增大迅速下降，环境中有风沙时，其电位值升高，风沙浓度较小时电位值增大 0.6 kV ，风沙浓度较大时该值增大 0.9 kV 。经宽频介电频谱分析仪测量的试验用沙粒介电常数为 3.5 ，高于空气的介电常数 1.006 ，因此，在沙粒和空气混合的空间介质中，沙粒承受的电场强度较小，导致不同沙尘颗粒间的空气区域承受比无沙粒时更大的电场强度，因此该区域内的空气承受的电压也变大，当施加的作用电压增大到一定值时，风沙环境下该区域内的空气更易于击穿，出现局部电弧。

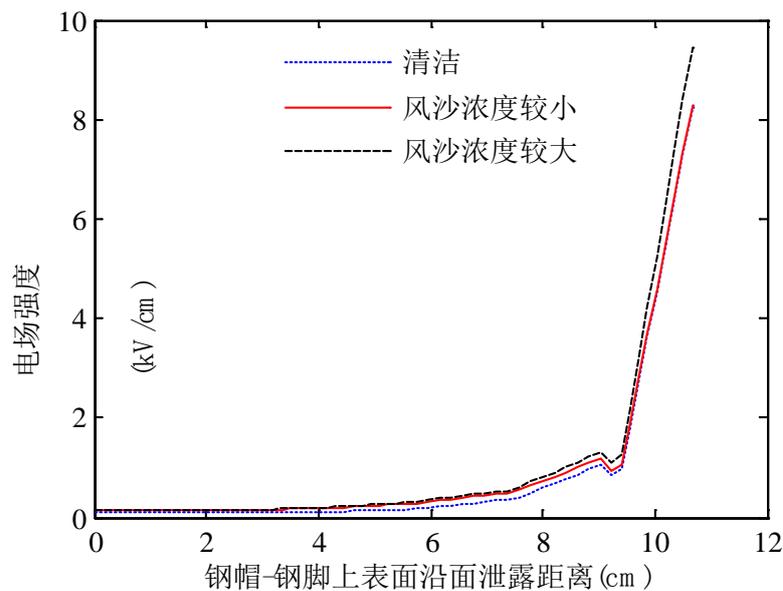


图 4.6 风沙环境下瓷绝缘子沿面电场分布

Fig.4.6 Electric field distribution of porcelain insulator with wind sand environment

图 4.6 表示绝缘子上表面沿面电场分布，当绝缘子周围环境出现沙粒后，绝缘子上表面较为平滑的区域其沿面电场强度几乎不发生变化，在曲率较大的区域其电场强度幅值略有加强，且沙粒浓度越大对该电场的畸变越明显，在该区域内同清洁环境下相比较，也易于发生局部电弧。图 4.5 及图 4.6 的仿真结果表明，在风沙环境下，相同的外部电压作用下，绝缘子附近的空气介质会承受更大的电场强度，当施加的电压增大到某一临界值时，该区域的空气易于发生局部电弧，同清洁环境相比，降低了发生局部电弧的起始电压，因此同无沙环境相比，沙尘环境下的绝缘子更易于发生闪络。

4.2.2 沙粒带电量对瓷绝缘子电场分布的影响

在实际沙尘天气中，由于沙粒在大风的作用下发生不对称摩擦而带上电荷，因此沙尘暴天气中的沙粒是带电沙粒和不带电沙粒的混合粒子群。由于试验室条件有限，无法模拟出这种混合性的粒子群，因此针对沙粒带电后对电场畸变作用的影响，采取电荷量梯度变化的方式研究了沙粒带上电荷以后对绝缘子闪络电压的影响。下文也针对沙粒带上电荷后对沿面电场的影响进行了仿真计算，沙粒带电量梯度根据荷质比进行设置，分别为 0 C/kg 、 $5 \times 10^{-8} \text{ C/kg}$ 、 $30 \times 10^{-8} \text{ C/kg}$ 、 $300 \times 10^{-8} \text{ C/kg}$ ，沙粒浓度为 10 g/m^3 ，仿真结果如图 4.7、图 4.8 和图 4.9 所示。

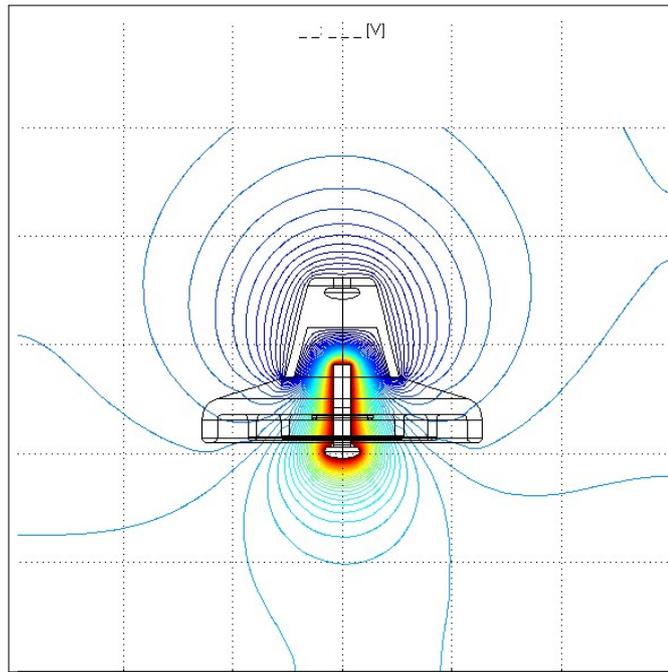


图 4.7 沙粒带电时瓷绝缘子电位分布

Fig.4.7 Potential distribution of porcelain insulator with sand particles charged

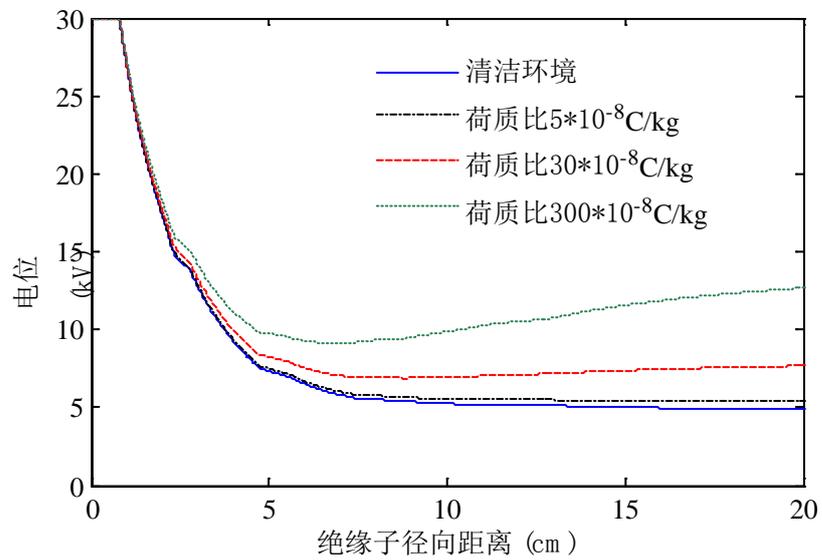


图 4.8 沙粒带电时瓷绝缘子径向电位分布

Fig.4.8 Potential distribution of porcelain insulator with sand particles charged

对比图 4.4 和图 4.7，绝缘子周围空间中分散的沙尘颗粒带上电荷后，其电位分布出现了明显的变化，在钢帽沿面区域空间介质的电位分布更为集中，瓷绝缘体上的电位分布也相应增强。图 4.8 为风沙环境中沙粒带电后绝缘子径向电位分

布。在绝缘子钢脚附近，带电沙粒的畸变作用不够明显，径向距离增大到 5cm 后，沙粒带电荷质比为 $30 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时空间介质电位同清洁环境下相比，增大 2 kV，而沙粒带电荷质比较小时，其电位分布上的差距不明显。图 4.9 为各个荷质比梯度下绝缘子上表面沿面泄露距离沿线上的电场强度，在沙粒荷质比为 $5 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时其电场强度曲线与清洁环境下电场强度曲线几乎重合，电场强度变化较小，仅有 0.0017kV/cm 。在沙粒荷质比为 $30 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时其电场强度有了明显的变化，在上表面较平滑的部分，电场强度增大 0.233kV/cm ，在曲率较大的地方增幅高达 0.6kV/cm 。同时也仿真了沙粒带电量较大时电场分布情况，参考中国旱区寒区研究所在沙粒带电量荷质比方面的研究成果，将沙粒带电荷质比设置为 $3 \times 10^{-6} \text{C/kg}$ 。由图 4.9 中可以发现，沙粒荷质比较大时，绝缘子沿面曲率较大的地方电场强度可增大 2~3 倍，由于试验条件限制，在人工模拟试验部分无法进行大电荷量的试验。

图 4.7、图 4.8 和图 4.9 的仿真结果表明：在风沙环境中且沙粒带电荷时，相同电压作用下，绝缘子周围空间介质承受的电场会增强，更容易产生局部电弧，即沙尘颗粒及其吸附的电荷会降低绝缘子沿面气体的起弧电压，因此在该环境下，绝缘子发生沿面闪络的作用电压会降低，如人工试验结果图 3.2 所示。

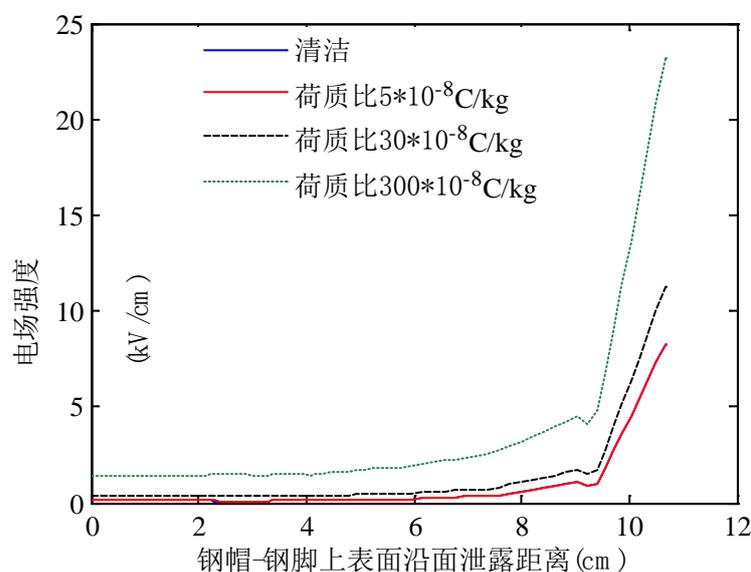


图 4.9 沙粒带电量时瓷绝缘体沿面电场分布

Fig.4.9 Electric field distribution of porcelain insulator with sand particles charged

4.2.3 沙尘沉积对瓷绝缘子电场分布的影响

人工模拟试验过程中发现沙尘沉积在绝缘设备表面时，随着施加电压的升高，沉积的沙粒会发生起跳现象，形成若干无沙区域。大量的独立重复试验中绝缘子

主闪络通道均通过这些无沙区域。因此本文在仿真分析沙尘沉积于绝缘子表面后对其沿面电场强度分布的影响时，分别设置绝缘子表面无沙、绝缘子表面均匀覆盖沙层、绝缘子表面沙层出现无沙区域三种情况，为了计算方便，认为绝缘子表面沙层厚度一致，此时绝缘子及沙尘层呈对称分布，可以采用二维轴对称仿真模型进行仿真计算，其计算结果见图 4.10 所示。

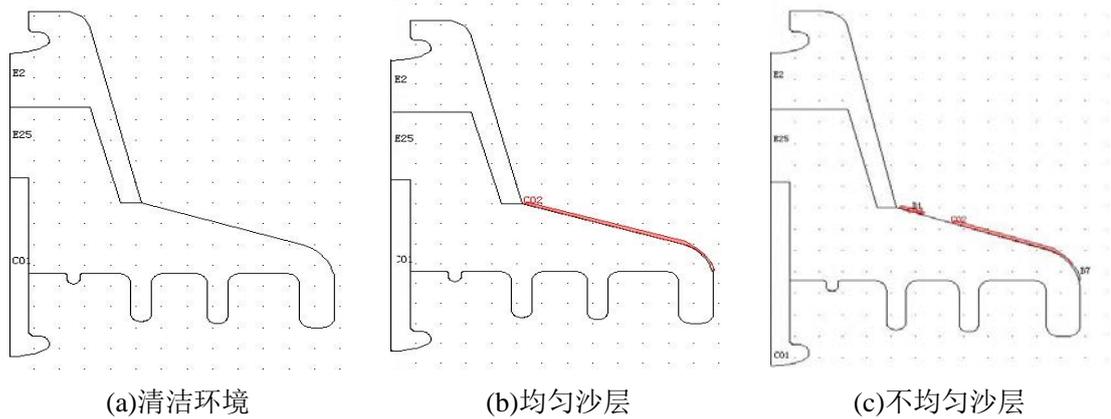
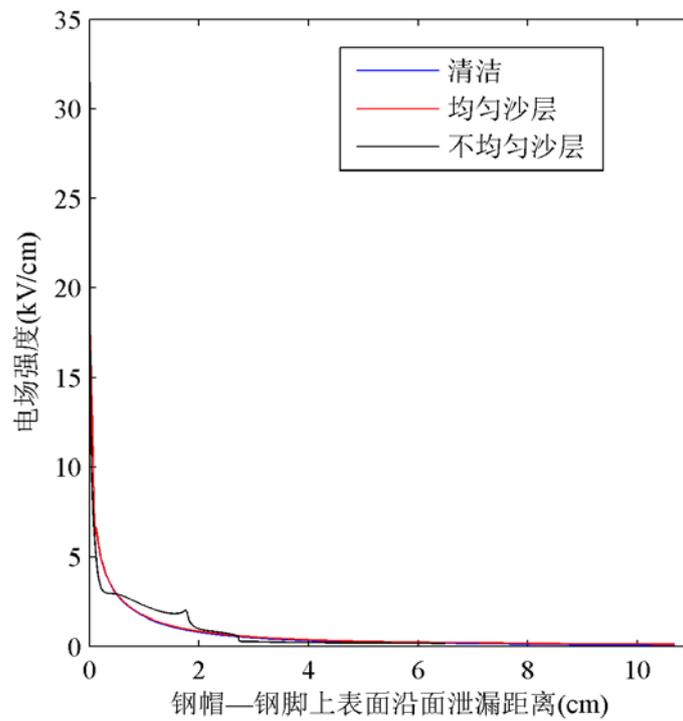
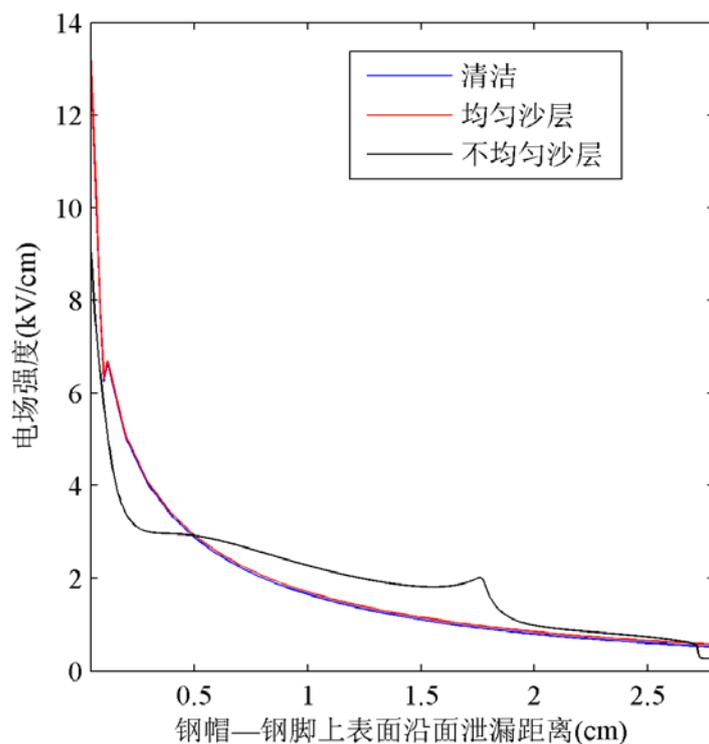


图 4.10 沙尘沉积瓷绝缘子仿真模型

Fig.4.10 Simulation model of porcelain insulator with sand particles deposited



(a) 绝缘子表面沉积沙尘时电场强度分布



(b) 无沙区域细节图

图 4.11 绝缘子表面沉积沙尘时电场强度分布

Fig.4.11 Electric field distribution of porcelain insulator with sand particles deposited

由图 4.11 可以发现，绝缘子表面沉积均匀沙层时，其沿面电场强度值及其变化趋势与无沙尘沉积时几乎一致，说明沙尘沉积在绝缘子表面上时对其电场几乎没影响。当沉积的沙层出现无沙区域不再均匀时，如图 4.11 中沿面距离为 0.5cm~2.6cm 区间形成无沙区域，在该区间内绝缘子沿面电场强度明显加强，导致空气承受的电场强度增大，更容易发生闪络。

4.3 本章小结

本章介绍了有限元法计算电场的基本原理，并基于 COMSOL Multiphysics 电场仿真软件建立了 XP-70 瓷绝缘子的仿真模型，对沙尘环境下瓷绝缘子沿面电场进行了仿真计算，结果表明：绝缘子周围的沙粒不带电时对绝缘子沿面电场分布的影响很小；沙粒带上电荷后会对沿面绝缘子电场强度产生畸变，畸变程度与沙粒带电量有关；沙尘均匀沉积在绝缘子表面上时，对绝缘子沿面电场分布的影响不明显，但在沙层中出现无沙区域后，该区域内的电场强度明显增强。

5 沙尘环境下绝缘子沿面闪络过程及放电机理分析

5.1 引言

污秽绝缘子的沿面放电过程是一个涉及到电、热和化学的错综复杂的变化过程，宏观上它们发生闪络必须经历积污、受潮、形成干燥带并产生局部电、局部电弧发展至完全闪络四个阶段^[47]：

①绝缘子表面形成污秽层：绝缘子表面沉积一层污秽物，污秽物中含有不导电的惰性物质和受潮即可溶解的盐类或酸碱等物质，只要污秽层不是电解液如盐水飞沫和稀酸，一般污层在干燥状态下是不导电，积污是污秽闪络的前提条件。

②污秽绝缘子表面受潮：大多数污秽物在干燥状态时具有很高的电阻值，该状态下绝缘子放电电压和洁净干燥时非常接近。潮气吸收、凝露和降雨都可能使绝缘子受潮，在相对湿度较大（大于 75%），绝缘子的温度和环境温度相同时，其表面吸收潮气；当绝缘子表面温度低于露点时，空气中的水分在其表面凝露；大雨可能冲洗掉部分电解物和全部污秽层，放电过程的其他阶段不再发生，或者直接由雨水桥接伞裙而闪络。

③形成干燥带并产生局部电弧：由于污秽沿绝缘子表面的分布通常是不均匀的，且沿绝缘子泄漏路径的直径也不同，因此绝缘子各个区段的泄漏电流密度是不同的，这就使得表面泄漏产生的热量对污层的烘干是不均匀的。由于结构形状或其它偶然因素的影响，在电流密度较大或污层电阻较大的局部地区，首先被烘干或形成干带。干带的出现将减小甚至中断泄漏电流，在这种情况下作用电压将主要集中在仅仅几厘米宽的干带上，导致干带上的空气可能击穿和产生泄漏电流脉冲。

④局部电弧发展至闪络：在一定条件下，桥接干区的局部电弧沿绝缘子表面持续发展，其趋势使与电弧串联的剩余污层电阻减小，电流增加，甚至将绝缘子表面桥接，最终导致相对地闪络。

污秽绝缘子发生沿面闪络的整个过程可归纳为绝缘子、污秽、受潮条件和所加电压之间相互作用的结果。本章在人工模拟试验和电场仿真的基础上，结合采用 HG-100K 高速摄像对其闪络过程的拍照，分析其在沙尘环境下发生闪络的机理。

5.2 扬沙环境下绝缘子沿面闪络过程分析

采用 HG-100K 高速摄像对瓷绝缘子 XP-70 在扬沙环境下闪络过程的拍摄时，设置每秒拍摄 1000 张，记录绝缘子从施加电压初始阶段到发生沿面闪络的整个过程，其闪络过程如图 5.1、图 5.2 所示。

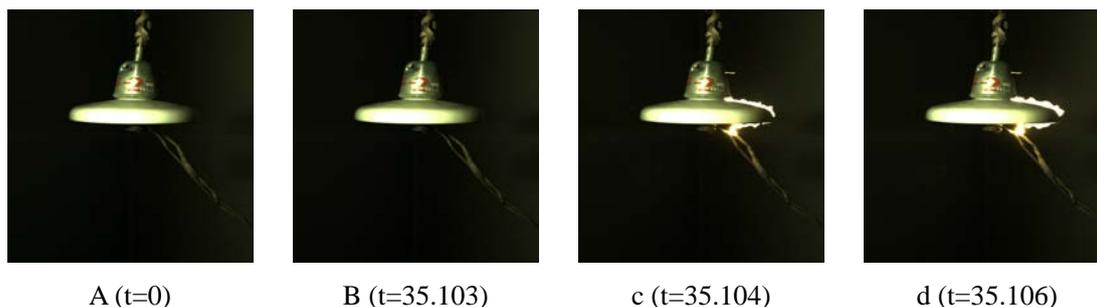
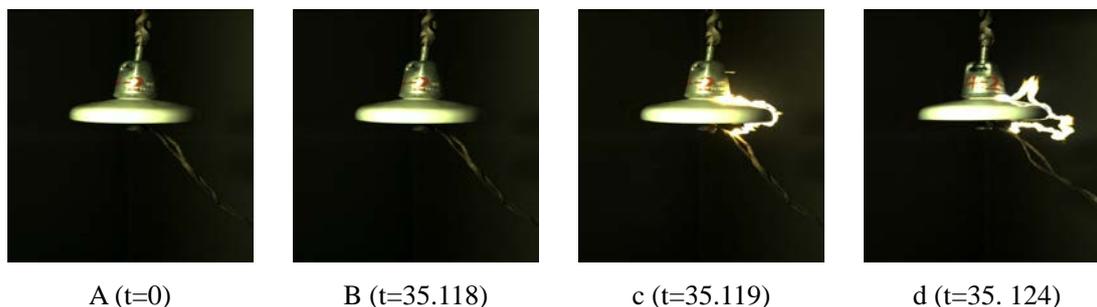


图 5.1 无风无沙环境下瓷绝缘子的交流闪络过程

Fig.5.1 Flashover process of the porcelain insulator in the wind sand environment

图 5.2 有风无沙环境下瓷绝缘子的交流闪络过程 ($V=6\text{m/s}$)Fig.5.2 Flashover process of the porcelain insulator in the wind sand environment
(wind speed=6m/s)

由图 5.1 可以看出,在清洁环境下对瓷绝缘子 XP-70 施加交流电压时,加压初始阶段($t=0\sim 35.103\text{s}$),绝缘子表面未出现局部电弧,但是发出了“滋滋滋”的电晕响声,随着施加电压的进一步升高,电晕的响声也越来越大,当电压达到一定值的时候($t=35.104\text{s}\sim 35.106\text{s}$),电弧瞬间贯穿绝缘子表面,形成完全沿面闪络,如图 5.1(c~d)所示。图 5.2 所示是在有风无沙($v=6\text{m/s}$)环境下瓷绝缘子的交流闪络过程,与清洁环境下绝缘子闪络过程相似:在加压初始阶段($t=0\sim 35.118\text{s}$),绝缘子表面同样未出现局部电弧且伴随有“滋滋滋”的电晕响声,当电压达到一定值的时候($t=35.119\text{s}\sim 35.124\text{s}$),电弧瞬间贯穿绝缘子表面,形成完全沿面闪络。但大风的影响,使得两种环境下的闪络过程也略有不同:有风环境下绝缘子发生完全闪络需要更长的时间,而且大风的吹弧作用非常明显,如图 5.2(d)所示。

对比图 5.1、图 5.2 的闪络过程可以发现,同无风环境相比,大风环境下绝缘子发生沿面闪络需要施加更高的作用电压,这也与人工模拟实验测的数据相吻合,如图 3.1 所示,在大风作用下绝缘子的闪络电压升高 2.61%。无风环境下绝缘子表面形成局部电弧后,促使局部电弧向前发展的主要因素是电弧头部附近存在的热电离^[61]。而大风的作用会影响电弧的发展:一方面,大风加快了绝缘子表面的空

气流通，会降低弧头温度进而影响热游离；另一方面，水平风向使弧头带电粒子受绝缘表面的切向力增大，降低了带电粒子与绝缘子表面碰撞的剧烈程度，阻碍了粒子温度的升高，间接影响了热游离；此外，电弧是一束质量很轻的游离态气体，靠电荷间的相互引力形成并维持其形状，在外力作用下，很容易发生弯曲、变形，当其受外界较大的水平力时，处于外围的部分离子被吹散，导致电弧被拉长，从而使已形成的局部电弧易于熄灭。基于以上三个方面，在有风环境下绝缘子放电发展会被动地增加熄灭和重燃的过程，放电持续的时间较长，而且闪络电压较高。

由于风沙环境下整个模拟室内均匀的弥漫着沙尘，能见度极低，很难清晰的观察到绝缘子闪络的过程。但从人工模拟实验测的数据（图 3.1）中可以发现，风沙共同作用下绝缘子的交流闪络电压比其在有风无沙环境下的交流闪络电压略低，但高于清洁环境下绝缘子的交流闪络电压。究其原因，此时绝缘子发生沿面闪络既受风的影响也受沙尘颗粒的影响。由上文风沙环境下绝缘子电场分布仿真结果可知（见图 4.5、图 4.6 所示），风沙流经过时会畸变原有空间电场分布。一方面，电场分布受介质介电常数的影响很显著，沙粒的介电常数相对于空气的较大，因此，环境中出现多种电介质时会加剧对原单一介质电场分布的畸变程度；另一方面，受绝缘子附近高场强影响，沙粒表面吸附的水分将会强烈极化，水分的电离度增加会增多绝缘子附近空间的离子数量，导致绝缘子附近原有的电场分布发生改变。根据仿真结果，虽然空间环境中的沙粒对绝缘子表面电场分布的影响能力有限，但仍是加强了绝缘子表面的电场强度，因此风沙共同作用下绝缘子闪络电压会比有风无沙时降低。

在风沙环境下沙粒吸附电荷形成带电沙粒后，绝缘子的闪络过程与沙粒不带电时类似，绝缘子沿面闪络时出现明显的飘弧现象。带电沙粒形成的附加电场对绝缘子闪络电压的影响与其带电量有关，试验条件下的沙粒荷质比为 $30 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时对沿面电场畸变度较为明显，会较大幅度的降低绝缘子闪络电压。

5.3 沙尘沉积环境下绝缘子沿面闪络过程分析

通过观察沙尘沉积作用下绝缘子的闪络过程，发现不同沙粒沉积密度下沿面闪络特性呈现不同的特点，下文在固定污秽等级(等值附盐密度 $\rho_{\text{ESDD}}=0.05\text{mg/cm}^2$)条件下，以两种典型的沉积密度下的放电过程进行分析，沉积密度分为较小 (10mg/cm^2) 和较大 (50mg/cm^2) 两种情况。

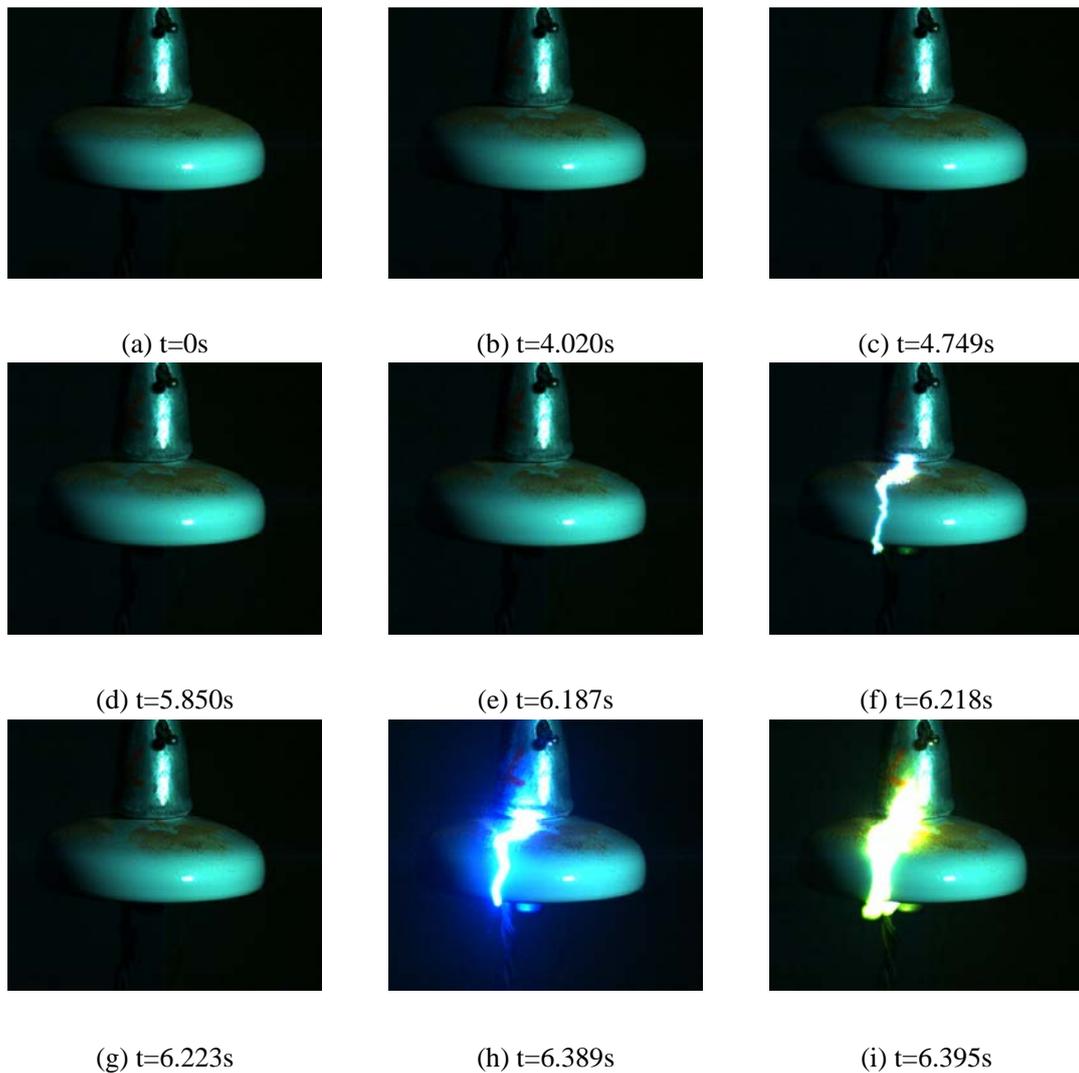
图 5.3 沙尘密度 ρ 为 10 mg/cm^2 时瓷绝缘子闪络过程Fig.5.3 Flashover process of the porcelain insulator with $\rho = 10 \text{ mg/cm}^2$

图 5.3 所示为沙粒沉积密度较小时绝缘子的闪络过程，图 5.4 所示为对应绝缘子闪络过程中泄漏电流的变化。由于沙粒沉积密度较小，沙粒均匀、分散的覆盖绝缘表面，沙粒间间隙较大，不会影响绝缘子表面污秽层吸收空气中的水分，污秽层可以充分润湿。随着绝缘子上所施加电压的升高，泄漏电流逐渐增大，如图 5.4 所示。在加压初始阶段($t < 4.5\text{s}$)，泄漏电流幅值较小，发热量小，对绝缘子表面的沙粒层影响很小，对应图 5.3(a)~(b)。随着施加电压的继续升高，泄漏电流幅值明显的增大($t = 5 \sim 6\text{s}$)，在电流密度集中的区域因泄漏电流作用产生大量的热量。沙粒是典型的低比热容固体颗粒，在吸收相同热量的条件下，温度变化更为明显，因此电流密度集中区域的沙粒很快会被烤干。这些干燥了的沙粒在电场垂直分量的作用下激烈地碰撞绝缘子表面，导致部分沙粒带电，同时受法向电场力的作用这些带电沙粒向周围运动，在绝缘子表面形成若干无沙区域，如图 5.3(c)~(e)所示，

且无沙区域会逐渐扩大，由于沙的介电常数比空气大，无沙区域内电场强度比有沙区域要大，其区域内很容易发生放电^[32]。当所施加的电压达到某临界值时，会出现明亮的局部电弧，泄漏电流伴随着局部电弧的重燃和熄灭而产生大量脉冲电流。随着施加电压的进一步升高，当局部电弧发展到低压电极，导致沿面完全闪络，如图 5.3(f)~(i)所示。在电弧出现后，通道附近的沙粒会发生向上跃起的现象，在图 5.3(i)可以明显的观察到。观察图 5.3(d)~(i)，可以发现局部电弧及最终闪络通道均发生在无沙区域，这与上一章节中电场仿真得出的结论相似，即无沙区域内其电场强度会显著的增大。

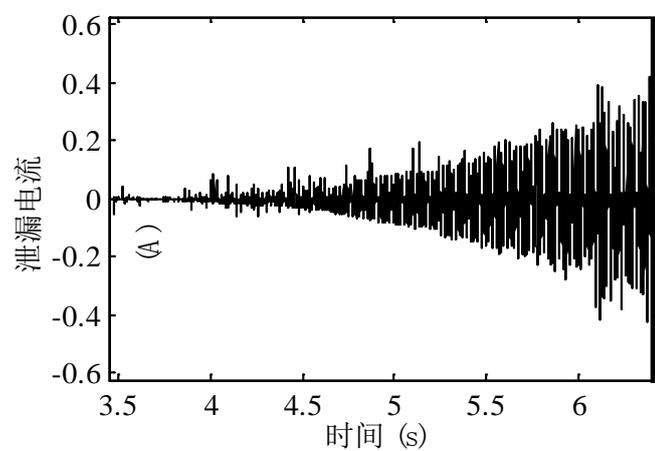
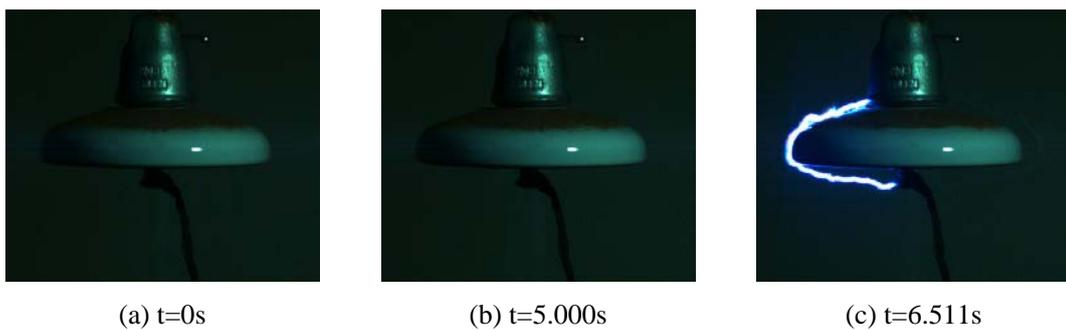


图 5.4 沙尘沉积密度为 10 mg/cm^2 时瓷绝缘子泄漏电流

Fig.5.4 Leakage current during the flashover of the porcelain insulator with $\rho = 10 \text{ mg/cm}^2$



(a) $t=0\text{s}$

(b) $t=5.000\text{s}$

(c) $t=6.511\text{s}$

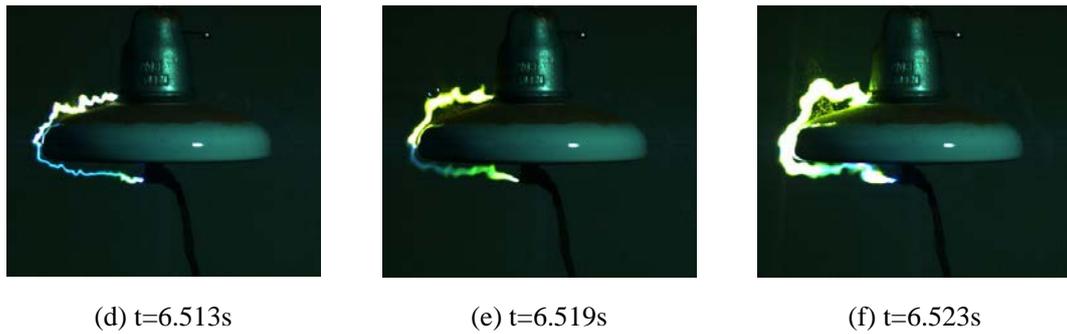
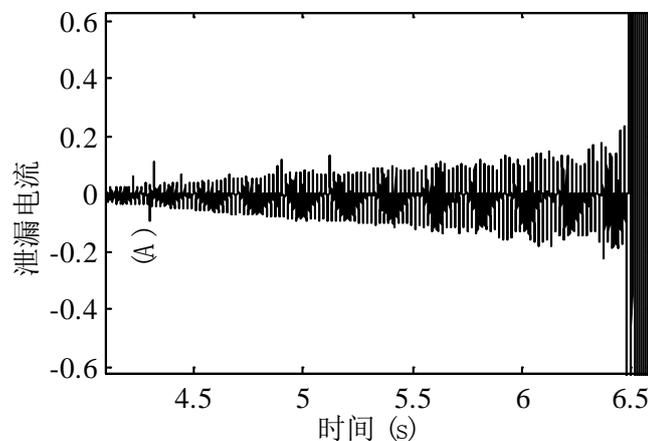
图 5.5 沙尘密度 $\rho = 50 \text{ mg/cm}^2$ 时瓷绝缘子闪络过程Fig.5.5 Flashover process of the porcelain insulator with $\rho = 50 \text{ mg/cm}^2$

图 5.5 为沙粒沉积密度较大时绝缘子的闪络过程，图 5.6 为其对应闪络过程中泄漏电流幅值的变化趋势。对比图 5.3 和图 5.5，可以发现沙尘沉积量较大时其闪络过程明显的不同于沉积密度较小时的现象。随着施加电压的升高，没有无沙区域的形成，当电压升高到某一临界值时，电弧瞬间贯穿两极，形成沿面闪络，如图 5.5(a)~(c)所示。在主放电通道上方仍能看到跃起的沙粒，如图 5.5(f)，这说明主放电通道上方的沙粒在高温电弧的作用下被烤干，并且这些沙粒在电弧形成时带上电荷，受电场强垂直分量的作用而发生起跳运动。

图 5.6 沙尘沉积密度为 50 mg/cm^2 时瓷绝缘子泄漏电流Fig.5.6 Leakage current during the flashover of the porcelain insulator with $\rho = 50 \text{ mg/cm}^2$

由图 5.6 可以看出随着施加电压的升高，泄漏电流变化不大，绝缘子闪络前其泄漏电流幅值也只有 200 mA ，而图 5.4 中泄漏电流在闪络前达到 400 mA 。这主要是沉积在绝缘子上厚厚的沙粒层全覆盖其下的污秽，致使污秽层无法充分湿润，降低了其导电能力。而且厚厚的沙尘层吸水能力很差，只能做为水气的凝结核保持一定的水分，形成的水膜可以使表面的沙粒潮湿，但不足以渗透到污秽层溶解

污秽中的盐分，因此绝缘子的闪络电压反而比无沙粒沉积时升高。

为了对沙粒的吸水能力做进一步的证实，通过实验观察沙粒含水量的变化对绝缘子闪络电压产生的影响。实验中设置三个沙尘沉积密度梯度（即沙尘沉积量），各个沙尘沉积量下沙粒含水量 η 由公式(5.1)确定：

$$\frac{m_w}{m_s + m_w} = \eta\% \quad (5.1)$$

其中 m_w 、 m_s 分别代表水分和沙尘的质量，改变沙粒中水分的质量即可改变含水量，实验结果如图 5.7 所示。

由图 5.7 所示可发现，在各个沙尘沉积密度下，绝缘子闪络电压均随着沙粒含水百分比的增加而降低，当沙粒含水百分比超过 8% 后绝缘子闪络电压的变化趋于平缓，即此时沙粒已经充分潮湿，其吸收水分的能力趋于饱和。由此可以说明沙粒充分潮湿后会明显的降低绝缘子的闪络电压，且含水百分比及潮湿程度越大，闪络电压下降的越明显。

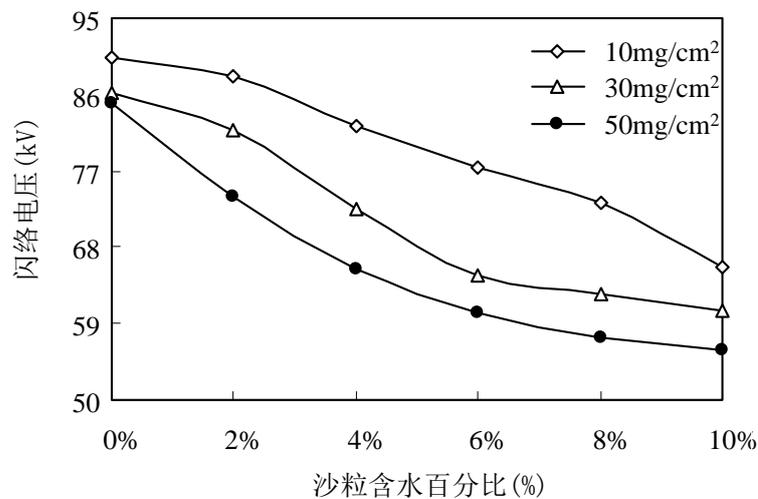


图 5.7 瓷绝缘子闪络电压与沙粒含水量的关系

Fig.5.7 Relationship between flashover voltage of porcelain insulator and moisture content of sand particles

若是将沉积了沙尘的绝缘子放入通有足量的热雾的雾室内，并在热雾环境下浸湿 15 分钟后再对其施加电压，其闪络电压下降百分比最大时为 9.21%，如表 3.2 所示。而图 5.7 中，沙粒沉积密度为 50 mg/cm²、含水百分比为 2% 时的绝缘子闪络电压下降百分比就高达 12.95%。对比以上两组数据，即可说明沙粒在热雾环境、充分长的时间条件下，吸收的水分百分比仅在 2% 左右，远低于使其充分潮湿的含

水百分比 8%，也即沙粒在热雾环境下虽受潮，但远未达到全部沙粒充分湿润的地步。沙尘沉积密度较小时受沙尘湿润程度的影响不大，原因是绝缘子污秽层不会被沙尘全部覆盖，可以吸收空气中的水分，充分溶解，导致绝缘子闪络电压会下降；然而，当沙粒密度较大时影响很显著，污秽层被完全覆盖而无法受潮溶解，因此会使得污秽绝缘子的闪络电压有一定升高。

5.4 本章小结

由于沙尘环境会改变绝缘子周围空间的介质环境，影响了绝缘子的沿面放电过程。沙粒的介电常数比空气大，因而在风沙环境下，空间环境中的沙粒会畸变绝缘子原有电场的分布，使绝缘子沿面电场增强，降低了绝缘子起弧电压；但同时大风的吹弧作用使电弧的发展被动的增加了熄灭、重燃的过程，延长了电弧发展的时间，而且风的影响占主导，因而风沙环境下绝缘子的沿面闪络电压升高。少量沙尘沉积在绝缘子表面时，流经绝缘子沿面的泄漏电流会起到明显的烘干作用，在泄漏电流密度比较大的地方会出现干燥带，干燥带附近的沙粒在电场力的作用发生跳跃的现象，绝缘子表面产生局部无沙区域；沙尘沉积量较大时，泄漏电流的烘干能力有限，绝缘子表面未出现干燥带及无沙区域，厚厚的沙尘层阻碍了电弧的发展，因而绝缘子闪络电压升高。

6 结论与展望

6.1 主要结论

本文在重庆大学沙尘模拟实验室,以 XP-70 瓷绝缘子为研究对象,进行沙尘环境下绝缘子交流闪络特性的研究,得出以下结论:

① XP-70 瓷绝缘子的交流闪络电压随风速的增大而升高,风沙环境下的闪络电压比有风无沙时稍低;沙粒荷质比从 $5 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 上升至 $30 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时,XP-70 瓷绝缘子闪络电压降低,沙粒带正电荷时绝缘子闪络电压下降的幅度更大,最大降幅为 5.45%。

② 沉积沙粒对污秽绝缘子闪络电压的影响与盐密无关,是独立的,且 XP-70 瓷绝缘子的交流沙闪络电压与沙尘沉积量有关,在沉积量较小时,XP-70 瓷绝缘子的交流沙闪络电压随沙尘沉积量的增加而降低,最大降低幅度约为 18.0%;随着沙尘沉积量的继续增加,污秽绝缘子的闪络电压反而升高,这种现象与沉积沙粒的吸附水份的能力有关。

③ 将沙尘颗粒这种不溶性污秽物与污秽试验中常用来模拟不溶性污秽物的硅藻土对绝缘子闪络电压的影响进行了对比试验研究,结果表明在各个污秽等级下,两种不溶性污秽物对 XP-70 瓷绝缘子闪络电压的影响规律相似,且同等沉积密度时,沉积沙粒时对污秽绝缘子的闪络电压的影响幅度较小,因此,在风沙较大的地区用硅藻土模拟沙尘颗粒进行相关污秽等级标准的制定能够保证输电线路的安全运行。

④ 用多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了沙尘环境下 XP-70 瓷绝缘子电场仿真模型,对沙尘环境下 XP-70 瓷绝缘子的沿面电场分布进行了仿真分析。结果表明风沙环境对绝缘子沿面电场分布的畸变作用较小;沙粒带上电荷后产生的附加电场对绝缘子沿面的原电场分布的畸变作用比较明显,会抬高绝缘子沿面电场强度,抬高的幅度与沙粒带电量有关;沙尘均匀沉积在绝缘子上表面后对绝缘子的电场分布的影响不明显,当这些沙尘颗粒受电场力作用下形成无沙区域后,该区域的空气间隙承受的电场强度明显加强,会增加 0.5~1 倍。

⑤ 利用高速摄像机拍摄了 XP-70 瓷绝缘子在风沙环境中以及沙粒沉积时的闪络过程。风沙环境下,沙粒很难在绝缘子表面沉积,但是大风的吹弧作用十分明显,增加了电弧熄灭、重燃的过程,延长了电弧的发展时间。污秽绝缘子表面沉积少量沙粒时,在闪络过程中会出现“沙尘干燥带”,部分干燥沙粒区域的沙粒会发生起跳的现象,并向周围移动,形成若干无沙区域;在沉积的沙粒量较大时,不会出现明显的“干燥带”,也看不到无沙区域的形成。

6.2 后续研究工作的展望

针对沙尘环境影响绝缘子交流闪络特性的研究，本文进行了大量的人工污秽试验，积累了很多宝贵的试验数据，深入的分析了沙尘环境下各因素对绝缘子闪络电压、沿面电场分布的影响，并对绝缘子闪络过程和放电机理进行了分析。后续研究主要应从以下几方面着手：

① 相比于交流输电线路，直流线路中的绝缘设备更容易吸附和积累污秽，而且目前我国在建的多条大容量、特高压的直流输电线路都会经过风沙环境恶劣的西北部地区，因此研究风沙环境下绝缘子串的直流闪络特性具有十分重要的工程指导意义。

② 目前沙尘环境下绝缘子表面积污的研究大都依赖于人工污秽试验，研究过程不仅时间人力消耗巨大，而且研究结果分散性大、精确度难以控制，且难以有效的开展复杂绝缘结构表面积污的研究，因此，应建立一种有效的模型和相关求解方法并结合风沙电耦合电场的综合作用计算沙尘环境下绝缘设备表面积污以及污量分布。

③ 相关文献表明沙粒在不对称摩擦作用产生的最大荷质比为 $304 \mu\text{C}/\text{kg}$ ，而目前人工污秽试验中能够测得的实际荷质比仅有 $300\text{n C}/\text{kg}$ ，不同荷质比对绝缘子闪络特性的影响并非线性关系，在后续研究中应建立更完善的触发电场，使穿过其中的沙粒带电量在数量级上更接近于实际沙尘暴中沙粒的荷质比，这对研究沙粒带电量对绝缘子闪络电压的影响更有价值。

致 谢

本文的研究工作是在我的导师司马文霞教授的悉心关怀和精心指导下完成的，在我的研究生学习生涯和论文的研究工作中无不倾注着导师辛勤的汗水和心血。导师严谨的治学态度、渊博的知识、无私奉献的精神和平易近人的工作作风使我受益匪浅。从尊敬的导师身上，我不仅学到了扎实、宽广的专业知识，也学到了做人的道理。在此我要向我的导师致以最衷心的感谢和深深的敬意。

在攻读硕士研究生期间的学习生活中，还得到了许多老师的热情关心和帮助，靳小英老师、杨庆老师，袁涛老师，胡建林老师，陈明英老师，卢志老师等等，都给予我很大的帮助，在此我要表示我衷心的感谢和敬意。此外要对重庆大学高电压实验室的所有老师和研究生兄弟姐妹们、师兄师弟们的关心和帮助表示由衷的谢意！

感谢我的父母和亲人在求学之路上的支持和关心！

最后，忠心地感谢在百忙之中评阅论文及参加答辩的各位专家、老师！

程 浩

二〇一一年五月 于重庆大学

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张鸿发, 屈建军, 言穆弘. 风沙起电的风洞实验研究[J]. 高原气象, 2002.8.No.4: 402~407.
- [3] Gill E WB. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 18 (4): 568-569.
- [4] Latham J. the Electrification of Snowstorms and Sandstorms[J]. Q J RmeteorSoc, 1964, 90:91-95
- [5] DS, RS Schmidt. Electrostatic Force on Saltating Sand[J]. JGR, 1998, 103 (4):8997-9001.
- [6] Schmidt DS, Dent J D. a Theoretical of the Effects of Electrostatic Forces on Saltating Snow Particles [J]. Ann Glaciol, 1993, 18:234-238.
- [7] Greeler, R Leach. a Preliminary Assessment of the Effects of Electrosta Ties on Aeolian Process[R]. Rep Plane, Geol. Program. NASA TM79729, 1978, 236-237.
- [8] 黄宁, 郑晓静, 风沙流中沙粒带电现象的实验测试[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2232-2235.
- [9] 张鸿发, 沙尘暴点效应的实验观察研究[J]. 地球物理学报, 2004, Vol.47, No.1:47~53.
- [10] 李芳, 屈建军. 风沙电研究的现状及展望[J]. 地球科学进展, 2002.8, 17(4): 572-575.
- [11] 屈建军, 王涛. 沙尘暴风洞模拟实验的综述[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 109-115.
- [12] 张鸿发. 风沙起电的风洞实验研究[J]. 高原气象, 2002, 4: 402-407.
- [13] 屈建军. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003, 33(6): 593-601.
- [14] 郑晓静, 周又和. 风沙运动研究中的若干关键力学问题[J]. 力学与实践, 2003, 25(2):1-6
- [15] 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.
- [16] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. 力学与实践, 2007, 29(4): 9-16.
- [17] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50a[J]. 中国沙漠, 2005.11, 25(6): 795-815.
- [18] 何丽红, 郑晓静. 风沙电多场耦合模型及其对风沙流结构的影响[J]. 兰州大学学报, 2005.6, 41(3): 87-92.
- [19] 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究[J]. 科学导报, 2007, 25(14): 22-27.
- [20] 屈建军, 俎瑞平, 等. 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): 34-538.
- [21] 鲁录义, 顾兆林, 罗昔联等. 一种风沙运动的颗粒动力学静电起电模型[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6939-6945.
- [22] M . I . Qureshi, A.A. Al-Arainy and N.H. Malik. Performance of Rod-Rod Gaps in the Presence of Dust Particles under Lightning Impulses [J]. IEEE Transactions on Power Delivery April

- 1991, 6(2):706-714.
- [23] A.A.Al-Arainy and N.H. Malik, M . I . Qureshi. Influence of Desert Pollution on the Lightning Impulse Breakdown Voltages of Rod to Plane Air Gaps. IEEE Transactions on Power Delivery, January 1991, 6(1):421-428.
- [24] M.I.Qureshi, A.A. Al-Arainy and N.H. Malik. Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of asymmetrical Air Gaps under Lightning Impulses. IEEE Transactions on Electrical Insulation, April,1992, 27(2):193-206.
- [25] M.I.Qureshi, A.A. Al-Arainy and N.H. Malik. Performance of Rod-Rod Gaps in the Presence of Dust Particles under Standard Switching Impulses. IEEE Transactions on Power Delivery, July, 1993, 8(3):1045-1051.
- [26] M.I. Qureshi, A.A. Al-Arainy and N.H. Malik. Influence of Sand/Dust Contamination on the Breakdown of asymmetrical Air Gaps under Switching Impulses. IEEE Transactions on Electrical Insulation, April,1994, 1(2):305-314.
- [27] M.I.Qureshi, A.A. Al-Arainy and N.H. Malik. Performance of Protective Rod Gaps for Medium Voltage Networks in the Presence of Dust Particles under Lightning Impulses. IEEE Transactions on Power Delivery, October , 1999, 14(4):1311-1315.
- [28] 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.
- [29] 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]. 硕士论文, 重庆大学, 2008.5.
- [30] 马高权. 风沙环境下绝缘沿面放电特性研究[D]. 硕士论文, 重庆大学, 2009.5
- [31] 司马文霞, 杨庆, 吴亮 等. 平板模型沿面工频沙尘闪络特性的实验研究及放电机理分析 [J]. 电机工程学报, 2008, 28.
- [32] SIMA Wen-xia, YANG Qing, MA Gao-quan. 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.
- [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, 2008.12, Vol.34, No.12:2570-2574.
- [34] Zhong Yu, Zongren Peng, Peng Liu. The Influence of Charged Sand Particles on the External Insulation Performance of Composite Insulators in Sandstorm Condition[C]. In 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Indonesia (2006).
- [35] 贺博, 万军, 陈邦发, 高乃奎, 彭宗仁. 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(28): 1510-1514.

- [36] 扬沙与浮尘的区分方法[J], 陕西气象, 2002.6
- [37] 扬沙和浮尘成因的探讨及其观测[J], 浙江气象科技, 2000.2, Vol.22, No.1:44~46.
- [38] Abdel-Salam H.A. Hamza, Nagat M.K. Abdelgawad and Bahaa A. Arafa. Effect of Desert Environmental Conditions on the Flashover Voltage of Insulators [J].Energy Conversion and Management, October ,2001, 43(2):2437-2442.
- [39] International Standard, Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators (a.c.) [S]. IEC Publication, IEC 60507, 1991.
- [40] GB/T 4585—2004/IEC60507 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中华人民共和国国家标准化委员会联合发布, 北京:中国标准出版社, 1991.
- [41] DL/T859 高压交流系统用复合绝缘子人工污秽试验[S]. 中华人民共和国国家发展和改革委员会发布, 北京:中国电力出版社, 2004.
- [42] International Standard, Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions-Part 1: Definations, information and general principles [S]. IEC Publication, IEC 60518, 2008.
- [43] 张志劲. 低气压下绝缘子(长)串污闪特性及直流放电模型研究[D]. 博士论文, 重庆大学, 2007.10.
- [44] 张仁豫, 绝缘污秽放电, 北京: 水利电力出版社, 第一版, 1994.
- [45] 袁红波, 郭贤珊, 佛山电网 110kV-500 kV 输电线路污闪事故与对策, 华中电力, 2005, Vol.18, No.3:16-20.
- [46] 张冠军, 吴广宁, 刘刚. 高电压技术.北京: 机械工业出版社, 第一版, 2007.
- [47] 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.
- [48] 李毅.覆冰绝缘子交流闪络机理与泄漏电流特性研究[D]. 硕士论文, 长沙理工大学, 2009.4.
- [49] 黄欢.基于泄漏电流特征量的绝缘子污闪预测的研究[D]. 硕士论文, 重庆大学, 2008, 5.
- [50] 陈伟根, 夏青, 李璟延, 姚陈果, 司马文霞. 绝缘子污秽预测新特征量的泄漏电流时频特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(5):1107-1112.
- [51] 叶齐政, 顾温国, 齐军等. 运动水滴在尖一板直流电场中的放电研究 [J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 7-10.
- [52] Farouk A. M. Rizk. Effect of Floating Conducting Objects on Critical Switching Impulse Breakdown of Air Insulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1360-1370.
- [53] Cheng Zixia, Liang Xidong, Zhou Yuanxiang, etc. Study of Water Droplet Discharge by Electric Field Computation and High-speed Video [P]. Proceeding of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, June 1-5, 2003, Nagoya:

- 820-823.
- [54] M. Awad, F. Farid, E. El-Sharkawi. Breakdown Voltage of Medium Air Gaps under Sandstorm or Humidity Conditions in the Desert [P], IEE Conf. Publication, No. 189, Part 2, 1980:151-154.
- [55] Bo He, ZHANG Gang, CHEN Bangfa, etc. A study on the influence of sand-dust environment on air-gap breakdown discharge characteristics of plate-to-plate electrode [J]. SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy, 2010, 53(1): 1-7.
- [56] 黄斌, 交流电场对复合绝缘子覆冰过程及放电特性影响的研究[D]. 硕士学位论文, 重庆大学, 2008.5.
- [57] 夏强峰, 瓷质悬式绝缘子劣化非接触式检测方法的研究[D]. 硕士学位论文, 重庆大学, 2010.5.
- [58] 邓镓卓, 串联玻璃绝缘子改善复合绝缘子电场分布研究[D]. 硕士学位论文, 重庆大学, 2010.5.
- [59] 杨庆, 覆冰绝缘子沿面电场特性和放电模型研究[D], 博士论文, 重庆大学, 2006.12.
- [60] 贺博, 张刚, 陈帮发等. 沙尘环境对板-板电极气隙放电特性影响的模拟试验研究[J]. 中国科学, 2010, Vol.40, No.3:296-302.
- [61] 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]. 电机工程学报, 1993, 13:70-75.

附 录

作者在攻读硕士学位期间发表的论文目录

- [1] 司马文霞, 程浩, 杨庆, 袁涛, 杨鸣, 叶轩. 沙尘环境下绝缘子交流闪络特性及机理[J]. 高电压技术, 2011.04, Vol.37, No.4:834-840.
- [2] Wenxia-Sima, Qing Yang, Gaoquan Ma, Chilong Jiang, Liang Wu, Hao Cheng. Experiments and Analysis of Sand Dust Flashover of the Flat Plate Model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.17(2):572-581,2010.
- [3] Wenxia-Sima, Hao Cheng, Qing Yang, Youyuan Wang. Research on the Influence of AC Flashover in Wind Sand Enviroment[C], 2010 ISEI, SAN DIEGO.
- [4] 司马文霞, 程浩, 杨庆, 袁涛. 沙尘环境对绝缘子交流闪络特性影响的研究[C]. 重庆市电机工程学会 2010 年学术年会, 重庆.