

苏州大学学位论文独创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得苏州大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

论文作者签名：史耀亮 日期：2011.4.8



Y1909785

苏州大学学位论文使用授权声明

本人完全了解苏州大学关于收集、保存和使用学位论文的规定，即：学位论文著作权归属苏州大学。本学位论文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。苏州大学有权向国家图书馆、中国社科院文献信息情报中心、中国科学技术信息研究所（含万方数据电子出版社）、中国学术期刊（光盘版）电子杂志社送交本学位论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存和汇编学位论文，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。

涉密论文 ☐

本学位论文属 _____ 在 _____ 年 _____ 月解密后适用本规定。

非涉密论文 ☒

论文作者签名： 史耀虎 日 期： 2011. 4. 8

导 师 签 名： 高 强 日 期： 2011. 4. 8

摘 要

高压输电线路系统作为我国电力工业的重要基础设施,在电力能源运输方面起到了不可或缺的作用,因此保证其安全运行至关重要。沙尘暴在我国西北地区发生的次数有增多的趋势,而由沙尘暴导致的高压输电导线发生电晕放电及线路短路而引起高压输电网大面积停电事故的现象经常发生,严重影响了电网的安全运行。为了减少电力系统由于沙尘暴导致的经济损失,也为我国高压输电系统安全运行提供必要的理论支持,本文建立了沙尘暴环境下的高压输电导线周围电场分布的风沙电场耦合模型,对沙尘暴导致输电导线产生电晕放电现象的机理进行了研究。

首先,建立了高压输电导线在沙尘暴情况下的风沙气固两相流模型,对不同风速、不同粒径以及不同直径输电导线的情况分别进行了数值模拟,得到了各种情况下的沙粒浓度分布。模拟结果表明:在输电导线前端会出现沙粒堆积现象,随着风速的增大,堆积沙粒的体积分数有所减小;而随着粒径的增大,堆积沙粒的体积分数减小。同时,输电导线前端的沙粒会因为与输电导线的碰撞而出现反弹,之后沙粒跟随空气继续流动,输电导线后端会出现一段无沙粒区。

然后,阐述了输电导线电场的计算方法,用有限元-镜像法建立了沙尘环境下高压输电导线的沙-电耦合场模型。计算了沙尘环境情况下输电导线周围的电场强度的分布,并将其最大值与输电导线的起晕电场强度值进行比较,结果表明在沙尘过境情况下输电导线将发生电晕放电现象,并初步揭示了沙尘暴导致高压输电导线产生电晕放电的机理。

最后,通过多功能环境风洞实验,使用粒子图像测速法(PIV),对不同风速、不同直径输电导线周围的沙粒分布情况进行了实验及分析。实验结果表明:随着风速的增大,沙床上被吹起的沙粒增多,沙粒跃起的高度增加。将实验结果与风沙气固两相流的数值模拟结果进行对比,定性的证明了流场数值模拟的正确性。

本文通过对风沙气固两相流及有限元电场的数值模拟和风洞实验,初步揭示了沙尘暴情况下输电导线产生电晕的机理。沙尘暴通过高压输电导线时,由于沙粒的存在及大气湍流对沙粒的作用,输电导线周围的沙粒浓度分布不同,导致了

输电导线周围介质发生了改变,且沙粒带有一定的电荷,从而使输电导线周围电场强度分布发生畸变,超过了输电导线产生放电的电场强度,使输电导线产生电晕放电现象。

——关键词: 高压输电导线 沙尘暴 电晕 计算流体动力学 PIV

作 者: 史耀虎

指导教师: 高 强

Research on the Mechanism of Discharge of Transmission Line in Sand-dust Storm

Abstract

As an important basis for China's power industry facilities, high voltage transmission line system plays an indispensable part. To ensure its safe operation is very essential. There is a growing trend in the number of occurrence of dust storms in northwest of China. Sand-dust storm can cause corona and short circuit which may bring about large area power grid blockouts. They seriously affect the safety of power grid. To reduce economic losses of power system caused by sand-dust storms, and also to supply the necessary theoretical support for the safety of high voltage transmission system, a wind-sand-electricity coupling system of electric field distribution is built to research the mechanism of corona of transmission line in sand-dust storms. The system is made up of high voltage transmission line and sand around the transmission line.

First, a gas-solid flow model of transmission line surrounded by sand is built. Numerical simulation under different velocity, different sand diameter and different transmission line diameter situation is taken to obtain the volume fraction distribution of sand around the transmission line. The simulation result shows: sand accumulation appears in the front of transmission line. As the wind speed and sand diameter increases, the volume fraction of accumulation reduces. Meanwhile, sand collides with the front of the transmission line and rebounds, then continues to flow with the air. There will be a sand-free zone at the back of transmission line.

Then, the calculation methods of electric field of transmission line are described and finite element-image method is chosen to build a sand-electricity coupling model made up of high voltage transmission line and sand around transmission line. Electric field distribution of transmission line with sand around it is obtained. Compare the maximum electric field strength with the critical value of corona, and result shows that corona happens under sand-dust storm situation. Mechanism of discharge of transmission line in sand-dust storm is preliminary revealed.

Finally, with multi-function environmental wind tunnel experiment and particle

image velocimetry (PIV), experiments and analysis on sand distribution around transmission line are carried out under different velocity, different transmission line diameter. The result shows: as the wind speed increases, number and height of blown sand increases. Compared with results of numerical simulation, the experimental results qualitatively prove the correctness of numerical simulation.

By numerical simulation of wind-sand gas-solid flow and finite element electric field and wind tunnel experiment, mechanism of discharge of transmission line in sand-dust storm is preliminary revealed. When sand-dust storm comes through transmission line, because of the sand and atmospheric turbulence, sand distribution around transmission line is different which makes the medium around transmission line changed. Besides, sand carries certain amount charge while flowing. Electric field strength around transmission line distorts, of which maximum value exceeds the critical value of corona. Corona phenomenon happens on transmission line.

Key words: high-voltage transmission line; sand-dust storm; corona ;CFD; PIV

Written by : Shi Yaohu
Supervised by: Gao Qiang

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 风沙场研究现状	3
1.2.2 风沙电场研究现状	4
1.2.3 输电导线放电现象研究现状	6
1.3 研究内容和研究目标	6
第二章 风沙两相流理论及数值模拟	8
2.1 流体力学基础理论	8
2.1.1 流体力学控制方程	8
2.1.2 湍流控制方程	9
2.1.3 气固两相流的数学模型	10
2.2 数值模拟方法	11
2.2.1 计算流体力学简介	11
2.2.2 控制方程的离散	12
2.2.3 湍流的数值模拟方法	14
2.2.4 两相流的数值计算方法	16
2.3 输电导线周围风沙两相流模型的数值模拟	17
2.3.1 沙尘暴概述	17
2.3.2 风速、沙粒直径及导线选择	20
2.3.3 风沙气固两相流模型建立	24
2.4 数值模拟结果及分析	27
2.4.1 数值模拟结果	27
2.4.2 结论	31
2.5 本章小结	31
第三章 高压输电导线周围电场计算	32
3.1 高压输电线路电晕放电的产生	32
3.2 输电导线电场强度分布计算	32

3.2.1 电磁场理论基础	32
3.2.2 电场强度计算方法	33
3.3 输电导线电晕放电的起始场强	35
—— 3.4 输电导线周围场强计算	37
3.4.1 计算方法及单元类型	37
3.4.2 计算模型建立	38
3.4.3 计算结果及分析	43
3.4.4 结论	44
3.5 本章小结	44
第四章 输电导线周围沙尘分布的风洞实验	45
4.1 实验目的	45
4.2 风洞实验介绍	45
4.2.1 风洞实验的优点	45
4.2.2 风洞实验装置	45
4.2.3 粒子图像测速法 PIV	47
4.3 实验及数据处理	50
4.3.1 铺沙及连接仪器	50
4.3.2 标定	51
4.3.3 PIV 工作步骤	52
4.3.4 实验数据处理	52
4.4 互相关分析及结论	54
4.5 本章小结	59
第五章 结论与展望	60
5.1 总结	60
5.2 展望	61
参 考 文 献	62
攻读学位期间本人出版或公开发表的论著、论文	66
致 谢	67

第一章 绪 论

1.1 研究背景

近年来，随着用电需求的持续快速增长，电力发展速度进一步加快，“十二五”规划纲要中提出：未来五年我国电网建设将基于“适应大规模跨区输电和新能源发电并网的要求”，着眼“完善区域主干电网”，加速发展特高压输电技术，加快建设“现代电网体系”。国家电网公司立足我国能源分布和生产力发展不平衡的基本国情，在现有330 KV、500 KV和750 KV高压输电线路的基础上，规划建设交流1100 KV和直流800 KV特高压电网，以求在更大范围内优化配置电力资源，实现我国有限能源资源的高效利用^[1]。作为重要的生命线工程，输电线系统的破坏会导致供电系统的瘫痪，这不仅会造成重大的经济损失，同时可能会引发火灾等一系列次生灾害，给社会和人民的生命财产造成重大威胁。

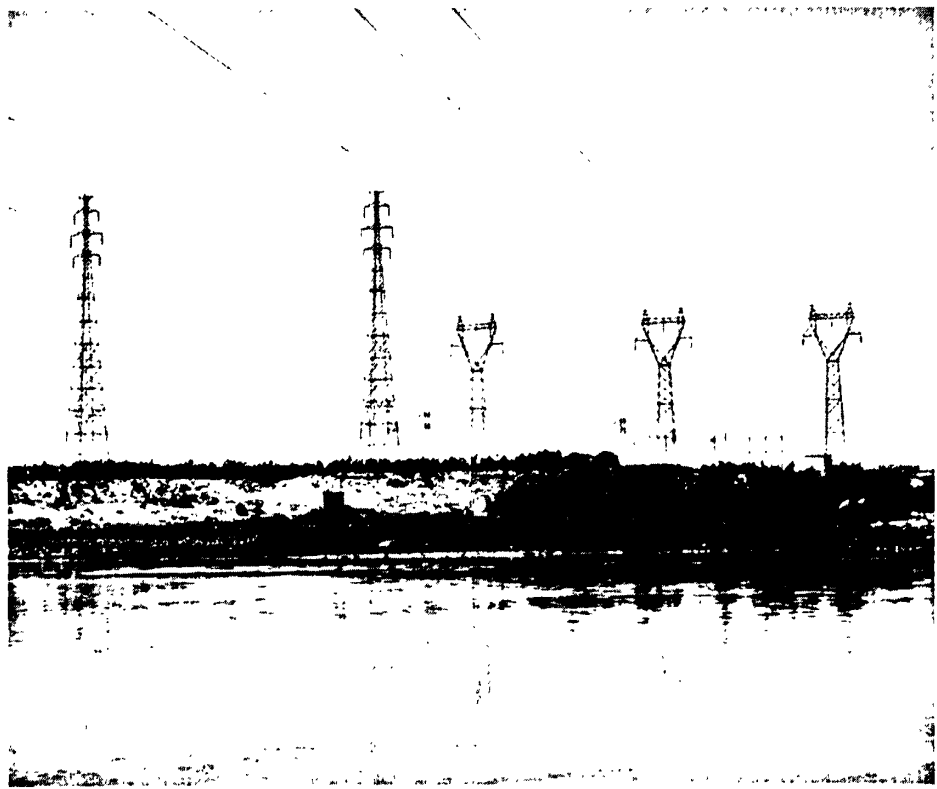


图1.1 高压输电线路

近年来,沙尘暴频发,整个影响区域明显向东、向南扩展,一直延伸到长江中下游地区;同样,包含沙尘暴、扬尘和浮尘的沙尘天气的影响范围则更广。据国家环保局的数据统计,我国每年因沙尘暴所受的损失高达540亿元。



图1.2 沙尘暴过境

2007年4月2日,北方沙尘南下空袭“长三角”地区,使得上海遭遇了7年以来最为严重的浮沉天气。北方的沙尘同时向西南部蔓延,使重庆及三峡库区和与川、黔、湘相连的广大地区被浮沉和细雨笼罩,能见度不足400米。近年来,由于北方沙尘暴比较严重,尤其是在冷空气的作用下,北方沙尘会随着空气快速南下,沿途给北方多省带来沙尘、扬尘等天气,而小颗粒物则被冷空气挟持着一直向东南方向输送。2010年3月21日,沙尘通过高空气流的远距离输送,到达苏州后落下,造成了苏州市浮尘的天气。

伴随着沙尘暴的过境,高压输电导线会出现高压打火、输电网络断电等现象,有时还击穿线路设备,危害人身安全,造成重大事故,严重影响到国家电力系统的可靠运行。2006年3月28日,河南郑州市发生沙尘暴。当天,郑州市共发生电力故障30多起,沙尘暴造成了两条高压线跳闸,出现大面积停电现象。同年4月10日,

内蒙古地区发生了强沙尘暴天气,同一天内蒙古地区电网发生了15条线路闪络事故。2006年4月10日18时,包头市遭受了10年来罕见的沙尘暴袭击,电网线路在5个多小时内相继发生跳闸事故54次。2007年2月9日及10日,由于沙尘暴的袭击,吐鲁番地区220 kV 红托线及220 kV 楼兰至哈密电网线均发生多次跳闸现象。2010年4月26日下午,罕见的8~10级大风突袭邯郸,城区内多处停电。自13点50分起输电线路跳闸共计118次,其中220 kV 线路2次,110 kV 线路4次,35 kV 线路27次,10 kV 线路96次,其中一台110 kV 主变跳闸、一条35 kV 母线、两条10 kV 母线跳闸,全网负荷下降82万千瓦,占总负荷的1/4。市区高压故障17次,损失负荷1.6万千瓦。以上都是在沙尘暴天气情况下发生的输电线路不明闪络放电现象。

在我国沙尘天气频发的北方干旱地区,都有已建成的高压、特高压输电线路通过。特别是在西部地区,输电线基本都是裸线。在联网的情况下,整体电力系统的这些主要联络线一旦发生故障,大面积的跳闸停电事故将会发生,其维修费用和造成的经济损失都是无法估量的。由于境内境外沙尘源的存在,注定在我国不可能根治沙尘暴,为了减少电力系统由于沙尘暴导致的经济损失,也为我国高压输电系统安全运行提供必要的理论支持,对输电系统由于沙尘暴导致输电线产生电晕甚至断电的研究显得格外重要。

到目前为止,关于沙尘暴对高压输电系统的影响的研究为数不多,其中对沙尘暴导致高压输电线产生电晕甚至断电的理论研究也罕见发表,特别是从风沙电场-输电线电场的多场耦合的角度去揭示沙尘暴导致输电线产生电晕放电的相关机理的研究未见涉及。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 风沙场研究现状

对于风沙现象研究起始于20世纪前半叶,Bagnold等^[2-4]着眼于野外观测及实验研究,在20世纪60~80年代,风沙现象的研究主要是数学建模和定量模拟。Owen^[5]建立了单个沙粒的运动模型,揭示了沙粒运动的一些基本特征。Ungar和Half^[6]建立了风场和沙粒的耦合数学模型。1988年,美国学者Anderson^[7]模拟计算了从沙粒起动到风沙流系统达到自平衡的过程,标志着风沙运动研究由微观和宏观研究的连接。

王洪涛^[8]利用粒子图像测速技术(PIV),在风洞内对与天然沙接近的石英沙风沙流沙颗粒浓度沿高度分布进行了研究。研究表明,风沙流中沙粒浓度沿水平方向基本不变,而随高度呈指数衰减,而且其衰减速率与风速密切相关。风速越大,衰减速率越慢;风速越小,衰减速率越快。

杨杰程^[9]等采用计算流体力学和颗粒离散元耦合的方法模拟三维风沙运动,得到了沙尘各部分速度分布的函数规律,计算得到的颗粒速度概率分布与实验基本保持一致。

郑晓静和王萍^[10]通过对描述沙粒垂向运动速度脉动分量的随机微分方程的直接求解,获得了风沙流中沙粒运动的随机轨迹。其计算结果表明,由于沙粒垂向脉动速度的影响,沙粒的轨迹与不考虑其垂向脉动速度的情形存在明显不同。在此基础上,通过对大量轨迹的统计计算,得到了沙粒浓度的分布规律。

1.2.2 风沙电场研究现状

风沙带电是风沙运动与沙尘暴过程中的常见现象,它可以引起干旱、半干旱沙漠地区高压线火花放电,输电网跳闸,甚至发生设备被击穿和人身伤亡等事故;同时还有研究表明,风-沙-电现象对地球以及其它星球上的风沙运动、沙尘暴和尘卷,以及地貌的形成都有很重要的影响。因此,对风沙起电现象的起源机理及其影响的研究具有重要的意义

在很早就开始有人对沙粒带电现象及其影响(如Greely^[11~12]等, Schmidt^[13]等、Lathma^[14])进行了研究。

Schmidt等对野外风沙流中的风沙电场和跃移沙粒的平均带电量-荷质比(单位质量沙粒的带电量)进行测量后发现风沙流中的跃移沙粒所受到的静电力和自身的重力为同一个数量级,他们的计算结果表明带电沙粒在风沙电场中运动时,静电力大约可使沙粒的跃移轨道上升或下降20%左右。

近年来,兰州大学的郑晓静^[15]等通过风洞实验对风沙流中的风沙电场和沙粒的荷质比随粒径、高度、风速的变化规律进行了研究,并给出了考虑风沙耦合作用且风沙流处于平衡状态时静电力对诸如沙粒平均跃移轨迹、单宽输沙率以及贴地风速廓线等的影响。黄宁^[16]等通过风洞试验得到了每千克运动沙粒所带平均电荷量随沙粒粒径和风速的增大而减小,随高度的上升而增加;风沙流中的电场主要是由运动着的带电沙粒形成的,其方向垂直地面向上,与晴天电场的正方向相

反, 且其值随风速和高度的增加而增大的结论。这些实验结果将为开展风-沙-电现象的理论分析奠定基础。

鲁录义和顾兆林^[17]等针对沙尘暴、尘卷风为代表的风沙运动研究需要, 基于水的电离理论和颗粒动力学理论, 从沙粒碰撞摩擦行为出发, 研究粒径不同的颗粒系统静电机理, 他们提出了一种风沙运动颗粒碰撞的静电起电模型, 并通过实验得到在三种大小的颗粒系统中, 不同大小的颗粒平均带电量随时间的变化规律为大颗粒平均的带电量为正、小颗粒平均的带电量为负的结论。这也给出了风沙电场产生机理的一种解释方法。

作为沙粒带电的主要外在反映, 研究者们也注意到了因风沙电场的存在而产生的影响。Gill^[18]观测到沙尘暴过境地带, 出现了强电场和电火花现象发生, 同时还对无线电信号产生了干扰。

Farrell^[19]等在尘卷风电场测量中发现: 在50 m 的范围内电场强度达4 KV/m, 远远高于人们的预期估计。Farrell在对撒哈拉沙漠的一次强沙尘暴中测量电场时发现, 带负电的沙粒一般位于风沙流的上部, 而带正电的沙粒位于贴近地表的下方, 它们形成的风沙电场与晴天电场相反, 强度远大于晴天电场。

Crozier^[20]在新墨西哥州对沙尘暴进行的电场记录观测到一个大的负电荷中心。Kamra^[21]在对美国西南部某处发生的沙尘暴的测量中发现, 在离地面1.25 m 高度处正电场和负电场都有可能出现, 且一般可达数千伏/米。在如此高的电场强度下, 一般来说, 仪器的尖端会发生电晕, 以及尖端放电现象会发生。

Ali和Alhaider^[22]在利雅得附近对微米波的传播进行了实地测量, 对沙粒尺寸分布、复介电常数等提出假设以及简化计算的直接依据。最早运用风洞模拟实验测试对无线电通讯影响的是Rudy^[23], 他针对微波在沙尘暴中的散射, 讨论了沙尘暴对微波的反射率, 发现当频率 $f \leq 30\text{GHz}$ 时, 浓度较高的沙尘暴将对微波产生影响。

赵树宗^[24]和尹文言^[25]也在风洞中作了沙尘暴的模拟研究实验, 测量了沙粒尺寸分布以及对无线电通讯线路的影响。

屈建军^[26]等在风洞模拟试验中, 测量了不同风速、不同粒径的风沙流经过不同的材料、不同长度的导线后的风沙电位差的变化情况、伴雨情况下的风沙电位差, 对并导线产生电晕现象的原因进行了推测。

1.2.3 输电导线放电现象研究现状

在我国沙尘暴频发的地区, 输电及通讯线路大多为裸线, 在强沙尘暴发生时, 往往会产生很高的静电压。如在甘肃民勤观测站, 就曾在通讯线路上观测到由沙尘暴产生的附加电压高达 2700V [27]。我国学者还观察到尖端放电和“火线”现象, 并指出这会使通讯线路受到很大的干扰, 甚至会发生设备击穿和人身事故[28]。

贺博和张刚[29]等人依托自建的实验平台进行了沙尘环境下板-板电极气隙击穿试验, 通过比较分析沙尘环境和洁净空气下气隙击穿电压的差异, 沙尘浓度和风速对击穿电压的影响, 揭示了沙尘环境对气隙放电影响的基本规律。结果表明: 沙尘环境下气隙击穿电压和洁净空气条件相比明显降低, 且下降幅度随电极间距增加而增大; 击穿电压随沙尘浓度增大而降低, 随风速的增大呈先降低后升高的趋势。

郑天茹[30]主要针对山东地区干燥少雨、尘埃多的气候环境, 很容易在特高压直流输电线路表面形成毛刺, 从而将加剧线路电晕放电的情况, 着重分析了带有毛刺尖端的输电导线周围电场畸变以及所产生的电磁辐射场。

韩少卫[31]使用模拟电荷法分析了线路表面电场强度诸多影响因素, 并根据新的起晕电压判定方法计算了导线的起晕电压和起晕场强。他还分析了线路参数、大气条件和海拔高度对起晕电压和起晕场强的影响, 并对不同类型的导线进行了计算。

1.3 研究内容和研究目标

本文建立了有效的风沙流场-输电线电场的耦合模型, 通过对沙尘暴通过高压输电导线时的风沙气固两相流场分布的数值模拟, 并通过风洞实验加以验证。还对沙尘环境下的高压输电导线周围的电场分布进行了数值模拟计算, 初步揭示了高压输电线在沙尘暴环境下发生电晕放电现象的机理。

本文主要的工作概括为:

(1) 建立了模拟风沙气固两相流场结构的二维湍流模型和边界条件, 使用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 分别采用了欧拉模型及DPM模型对悬移沙尘随着大气湍流一起运动构成的稀相气固两相流在输电线周围的流场分布规律进行数值模拟。

(2) 通过有限元-镜像法建立了沙尘环境下高压输电导线的沙-电场的耦合模

型, 得出了在风沙流通过输电导线的情况下导线的电场分布, 并由此判断输电导线是否会产生电晕放电现象, 初步揭示沙尘暴导致高压输电线产生电晕放电的机理。

(3) 通过风洞实验, 并利用粒子图像测速法(PIV)技术, 对不同风速下的沙粒在输电导线周围的分布进行实验及结果分析, 验证风沙气固两相流数值模拟结果的正确性。

第二章 风沙两相流理论及数值模拟

沙尘暴是由气流和其夹带的沙尘颗粒所构成的风沙气固两相流，沙粒在气流的作用下，以不同的形式运动。沙粒的分布及气流的运动形式是风沙两相流研究的主要对象。

2.1 流体力学基础理论

2.1.1 流体力学控制方程

流体流动要受物理守恒定律的支配，基本的守恒定律包括：质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[32]。如果流动包含有不同成分（组元）的混合或相互作用，系统还要遵守组分守恒定律。如果流动处于湍流状态，系统还要遵守附加的湍流输运方程。

对于不可压缩粘性流体，在直角坐标系下，控制方程的通用形式为：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S \end{aligned} \quad (2.1)$$

式中：

ϕ ——通用变量，可以代表 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量；

Γ ——广义扩散系数；

S ——广义源项；

ρ ——流体的密度。

方程的分量形式可写为：

(1) 质量守恒方程（mass conservation equation）：

该定律可表述为：单位时间内流体微元中质量的增加，等于同一时间间隔内流入该微元体的净质量。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.2)$$

(2) 动量守恒方程 (momentum conservation equation) :

该定律可表述为: 微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元体上的各种力之和。该定律实际上是牛顿第二定律, 也称为 Navier-Stokes 方程。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(u \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \end{aligned} \quad (2.4)$$

(3) 能量守恒方程 (energy conservation equation) :

该定律可表述为: 微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上体力与面力对微元体所做的功。该定律实际是热力学第一定律。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \quad (2.5)$$

(4) 组分质量守恒方程 (species mass-conservation equation) :

该定律可表述为: 系统内某种化学组分质量对时间的变化率, 等于通过系统界面净扩散流量与通过化学反应产生的该组分的生产率之和。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho c_s u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c_s v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho c_s w)}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_s \frac{\partial(\rho c_s)}{\partial z} \right) + S_s \end{aligned} \quad (2.6)$$

2.1.2 湍流控制方程

2.1.2.1 湍流流动的特征

自然界中的流体流动状态主要有两种形式, 即层流 (laminar) 和湍流 (turbulence)。层流是指流体在流动过程中两层之间没有相互混掺, 而湍流是指流体不是处于分层流动状态, 一般来说, 湍流是普遍的, 而层流则属于个别情况。

对于圆管流动, 定义 Reynolds 数 (雷诺数) :

$$Re = ud/\nu \quad (2.7)$$

式中:

u ——液体流速;

ν ——运动粘度;

d ——管的直径。

当 $Re \leq 2300$, 管流一定为层流; $Re \geq 8000 \sim 12000$ 时, 管流一定为湍流; 当 $2300 < Re < 8000$ 时, 流动处于层流与湍流间的过渡区。

对于一般流动, 在计算 Reynolds 数时, 可用水力半径 R 代替上式中的 d 。这里:

$$R = A/x \quad (2.8)$$

A ——通流截面积;

x ——湿周。

对于液体, x 等于在通流截面上液体与固体接触的周界长度, 不包括自由液面以上的气体与固体接触的部分; 对于气体, 它等于通流截面的周界长度。

2.1.2.2 湍流的瞬时控制方程

考虑不可压流动, 使用笛卡尔坐标系, 速度矢量 u 在 x 、 y 和 z 方向的分量为 u 、 v 和 w , 湍流的瞬时控制方程如下:

$$\operatorname{div} u = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \operatorname{div}(uu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} u) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \operatorname{div}(vu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} v) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \operatorname{div}(wu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \operatorname{div}(\operatorname{grad} w) \quad (2.12)$$

一般认为, 无论湍流运动多么复杂, 非稳态的连续方程和 Navier-Stokes 方程对于湍流的瞬时运动仍然是适用的。

2.1.3 气固两相流的数学模型

目前气固两相流的数学模型主要分为连续介质模型和离散颗粒群模型^[33]。

1. 连续介质模型

连续介质模型是把颗粒当作连续介质来考虑。可分为以下几种模型：

(1)无滑移模型

其基本条件：颗粒相只有尺寸差别，不同的尺寸代表不同的相，温度和密度均相等；颗粒相的时均速度等于流体相速度。即相之间没有相对速度；相和相之间的相互作用，类似于混合物中各组分的作用，颗粒相与流体相之间的阻力忽略不计。

(2)小滑移模型

假定颗粒在流体的夹带下运动，同相的速度、温度、物质密度和颗粒直径相同，颗粒在流场中有扩散漂移，即小滑移。

(3)多流体模型

该模型基本假设在流场中，颗粒相与气相共存并相互渗透，每一项具有各自的速度，温度和体积分数。每一颗粒相在空间中具有连续的速度、温度和体积分数的分布。用初始尺寸来区分颗粒相，每个尺寸组的颗粒具有相同的速度和温度。

2.离散颗粒群模型

离散颗粒群模型是把颗粒当作离散介质来考虑。可分为以下两种：

(1)单颗粒动力学模型

单颗粒动力学模型是研究气固两相流最简化的模型。在该模型中忽略颗粒存在对流体流动的影响，并考察已知流体中互不相关的无脉动的单颗粒的运动。包括颗粒平均运动，颗粒速度及温度沿轨道的变化。

(2)颗粒随机轨道模型

颗粒随机轨道模型是以流体湍流统观模型为基础，加上颗粒瞬时运动方程，用随机方法来模拟湍流。该模型近年来在工程问题中得到了广泛应用。

2.2 数值模拟方法

2.2.1 计算流体动力学简介

计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所做的分析。CFD 的基本思想可以归结为：把原来在时间域及空间域上连续的物理量的场，用一系列有限个离散点上的变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立起

关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组，然后求解代数方程组获得场变量的近似值。

CFD 可以看作是在流动基本方程控制下对流动的数值模拟。通过这种数值模拟，可以得到极其复杂问题的流场内各个位置上的基本物理量的分布，以及这些物理量随时间的变化情况，确定涡旋分布特性、空话特性和脱流区等。

CFD 的求解过程如图 2.1 所示：

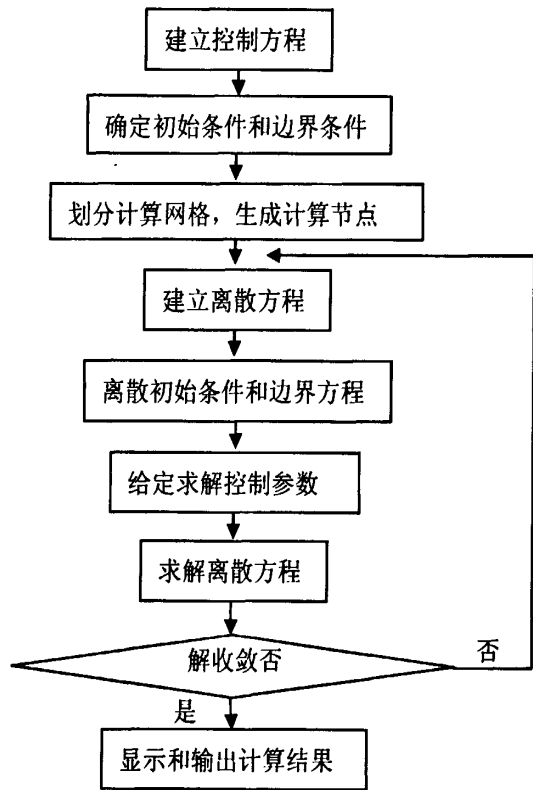


图2.1 CFD工作流程图

2.2.2 控制方程的离散

在 CFD 计算进行之前，先要将计算区域离散化，即对空间上连续的计算区域进行划分，把它划分为许多个子区域，并确定每个区域中的节点，从而生成网格。然后，将控制方程在网格上离散，即将偏微分格式的控制方程转化为各个节点上的代数方程组。

2.2.2.1 离散化的目的

对于在求解区域内所建立的偏微分方程，理论上是有真解（或称精确解、解析解）的。但是，由于所处理的问题自身的复杂性，如复杂的边界条件，或者方

程自身的复杂性,造成很难获得方程的真解,因此,就需要通过数值的方法将计算域内有限数量位置上的因变值当做基本未知量来处理,从而建立一组关于这些未知量的代数方程,然后通过代数方程组来得到这些节点值,而计算域内其他位置上的值则根据节点位置上的值来确定。

2.2.2.2 离散化的常用方法

1.有限差分法

有限差分法(Finite Difference Method,简称FDM)是数值解法中最经典的方法。FDM是将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域,然后将偏微分方程(控制方程)的导数用差商代替,推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求差分方程组(代数方程组)的解,就是微分方程定解问题的数值近似解,这是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法。

这种方法发展较早,比较成熟,较多的用于求解双曲型和抛物型问题。用它求解边界条件复杂、尤其是椭圆形问题不如下面提到的有限元法和有限体积法方便。

2.有限元法

有限元法(Finite Element Method,简称FEM)与有限差分法都是广泛应用的流动动力学数值计算方法。有限元是将一个连续的求解域任意分成适当形状的许多微小单元,并于各小单元分片构造差值函数,然后根据极值原理,将问题的控制方程转化为所有单元上的有限元方程,把总体的极值作为个单元极值之和,即将局部单元总体合成,形成嵌入了指定边界条件的代数方程组,求解该方程组就得到各节点上待求的函数值。

3.有限体积法

有限体积法(Finite Volume Method,简称FVM),又称为控制体积法(Control Volume Method,简称CVM)。其基本思路是:将计算区域划分为网格,并使每个网格点周围有一个互不重复的控制体积;将待解微分方程对每一个控制体积分,从而得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上的因变量 ϕ 。为了求出控制体积的积分,必须假定 ϕ 值在网格点之间的变化规律。从积分区域的选取方法看来,有限体积法属于加权余量法中的子域法,从未知解的近似方法看来,有限体积法

属于采用局部近似的离散方法。有限体积法是近年来发展非常迅速的一种离散化方法，其特点是计算效率高，目前在 CFD 领域得到了广泛的应用。

2.2.3 湍流的数值模拟方法

目前的湍流数值模拟方法可以分为直接数值模拟方法和非直接数值模拟方法。所谓直接数值模拟方法是指直接求解瞬时湍流控制方程。而非直接数值模拟方法就是不直接计算湍流的脉动特性，而是设法对湍流作某种程度的近似和简化处理。

1. 直接数值模拟 (Direct Numerical Simulation, 简称 DNS)

直接用瞬时的 Navier-Stokes 方程对湍流进行计算。DNS 的最大好处是无需对湍流流动作任何简化或近似，理论上可以得到相对精确的计算结果。湍流运动是十分复杂的，数值模拟时必须采用很小的时间与空间步长，才能分辨出湍流中详细的空间结构及变化剧烈的时间特性。基于这个原因，DNS 目前仅限于相对低的雷诺数中湍流流动模型。

2. 大涡模拟 (Large Eddy Simulation, 简称 LES)

把湍流中的小涡和大涡分开处理，用瞬态的 Navier-Stokes 方程求解各向异性的大尺度涡，不直接模拟小尺度涡，通过一种近似的模型来模拟各向同性的小尺度涡，而小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑。LES 方法对计算机内存和 CPU 速度要求很高，但低于 DNS。随着计算机硬件的飞速发展，大涡模拟方法的研究与应用日趋广泛。

3. Reynolds 平均法

Reynolds 平均法的核心是不直接求解瞬时的 Navier-Stokes 方程，而是求解时均化的 Reynolds 方程，这样不仅可以避免 DNS 方法的计算量大的问题，而且对工程的实际应用可以取得很好的结果。

(1) Reynolds 应力模型：直接构建表示 Reynolds 应力的方程，然后联立求解方程。通常情况下，Reynolds 应力方程式微分形式的，称为 Reynolds 应力方程模型。若将 Reynolds 应力方程的微分形式简化为代数方程的形式，则称之为代数应力方程模型。

(2) 涡粘模型：不直接处理 Reynolds 应力项，而是引入湍动粘度 (turbulent viscosity)，然后把湍流应力表示成湍动粘度的函数。确定湍动粘度是计算的关键。

涡粘模型分为三种：零方程模型，一方程模型，两方程模型。

零方程模型：使用代数关系式，把湍动粘度与时均值联系起来的模型。它只用湍流的时均连续方程和 Reynolds 方程组成方程组，把方程组中的 Reynolds 应力用平均速度场局部速度梯度来表示。

一方程模型：考虑到湍动的对流输运和扩散输运，比零方程模型更为合理。

二方程模型：

1) 标准 $k-\varepsilon$ 模型：标准 $k-\varepsilon$ 模型是基于湍动能 k 的方程的基础上，再引入一个关于湍动能耗散率 ε 的方程，称为标准 $k-\varepsilon$ 方程。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.14)$$

式中：

G_k ——由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项；

G_b ——由于浮力引起的湍动能 k 的产生项；

Y_M ——代表可压湍流中脉动扩张的贡献；

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ ——经验常数；

σ_k 和 σ_ε ——与湍动能 k 和耗散率 ε 对应的 Prandtl 数；

S_k 和 S_ε ——用户自定义源项。

2) RNG $k-\varepsilon$ 模型：通过大尺度运动和修正后的粘度项体现小尺度的影响，而使这些小尺度运动有系统地从控制方程中去除，是标准 $k-\varepsilon$ 模型的改进。

3) Realizable $k-\varepsilon$ 模型：引入了与旋转和曲率有关的内容，使湍动粘度计算公式发生了变化，此模型已经被有效的用于各种不同类型的流动模型。

(3) 壁面函数法 (wall functions)：是一组半经验公式，用于将壁面上的物理量与湍流核心区内待求的未知量直接联系起来。它必须与高 Re 数 $k-\varepsilon$ 模型配合

使用。

壁面函数法的基本思想是：对于湍流核心区的流动使用 $k-\varepsilon$ 模型求解，而在壁面区不进行求解，直接使用半经验公式将壁面上的物理量与湍流核心区内的求解变量联系起来。这样，不需要对壁面区内的流动进行求解，就可直接得到与壁面相邻控制体积的节点变量值。

2.2.4 两相流的数值计算方法

目前有两种处理多相流数值计算的方法^[34]：欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法。

欧拉-欧拉方法（双流模型）：不同的相被处理成为互相贯穿的连续介质。由于其中一种相所占的体积无法再被其他的相所占有，所以引入了相体积率（Volume Fraction）的概念。体积率是时间和空间的连续函数，各相的体积率之和等于 1。从各相的守恒方程可以推导出一组方程，这些方程对于所有的相都具有类似的形式。从实验得到的数据可以建立一些特定的关系，从而能使方程封闭。对于小颗粒流（granular flows），则可以通过应用分子运动论的理论使方程封闭。

欧拉-欧拉多相流模型分为：VOF（Volume of Fluid）模型，混合物（Mixture）模型和欧拉（Eulerian）模型。

（1）VOF 模型：在此模型中，不同的流体组分共用着一套动量方程。此种模型适用于要得到一种或者多种互不相容的流体间的交界面的情况。计算时，在整个流场的每个计算单元内都记录下各流体组分所占有的体积率。VOF 模型适用于分层流、自由面流动、晃动、水坝决堤时的水流以及任意液-气分界面的稳态或瞬时分界面。

（2）Mixture 模型：此模型求解的是混合物的动量方程，并通过相对速度来描述离散相。可用于两相流或者多项流（流体或者颗粒）。Mixture 模型的应用包括低负载的粒子负载流、气泡流和旋风分离器等。

（3）Eulerian 模型：建立了一套包含有 n 个动量方程和连续方程来求解每一相。压力项和各界面交换系数是耦合在一起的。耦合的方式则依赖于所含相的情况。欧拉模型的应用包括气泡柱、上浮和颗粒悬浮等情况。

欧拉-拉格朗日方法（颗粒轨道模型）：流体相被处理为连续相，通过直接求解时均化的 Navier-Stokes 方程来获得结果，而离散相则是通过计算流场中大量的

粒子、气泡或者液滴的运动所得到的。流体相和离散相之间可以有动量、质量和能量的交换。

颗粒轨道模型(DPM模型)的使用的条件是:假定第二相(分散相)非常稀薄,所以颗粒-颗粒之间的相互作用、颗粒体积分数对连续相的影响都没有进行考虑。这种假定意味着分散相的体积分数必然很低,一般说来要小于10~12%,但颗粒的质量承载率可以大于10~12%,可以模拟分散相质量流率等于或大于连续相的流动。

2.3 输电导线周围风沙两相流模型的数值模拟

2.3.1 沙尘暴概述

2.3.1.1 沙粒的运动特性

沙尘暴,是指强风把地面大量的沙尘卷入空中,使空气特别浑浊,水平能见度低于1千米的天气现象。

沙尘暴^[35]是由气流和其夹带的沙尘颗粒所构成的风沙两相流。沙粒运动是风沙两相流和风沙地貌研究中的重要组成部分,沙粒主要运动有滚动、滑动、和跳跃以及在气流中悬浮等多种形式。沙粒的主要运动形式及其具体划分方法如下:

(1) 蠕移(creep)

沙粒沿地表滑动或滚动称为蠕移运动。蠕移物质颗粒最粗,一般直径大于0.5 mm, 占总搬运量的15%~20%。

(2) 跃移(saltation)

沙粒脱离床面做跳跃式运动称为跃移。跃移的高度一般为在厘米的量级。跃移物质颗粒较粗,一般直径为0.2~0.5 mm之间, 占总搬运量的70%~80%,是风沙流最主要的搬运方式。跃移沙粒还可区分出不受气流湍流脉动影响的完全跃移和受气流湍流脉动影响的变形跃移两种类型。

(3) 悬移(suspension)

沙粒在一定时间内保持悬浮于空气中而不与地面接触的运动形式称为悬移。一般直径小于0.2 mm, 搬运距离较远、位置较高, 占总搬运量的5%~10%。悬移还可以分为长悬移和短悬移。

输电塔的高度通常是在几十米到数百米之间, 此高度的沙尘是在大气边界层

内做悬移运动，而且与大气边界层的湍流的运动规律是一致的。

(4) 蹦移 (reptation)

沙粒在跃移沙粒碰撞作用下的跳跃可称为蹦移，其运动高度一般只有沙粒粒径的几倍。在运动形式上类似于跃移，是介于蠕移和跃移之间的过渡运动形式。

沙粒的具体运动形式如图 2.2 所示。

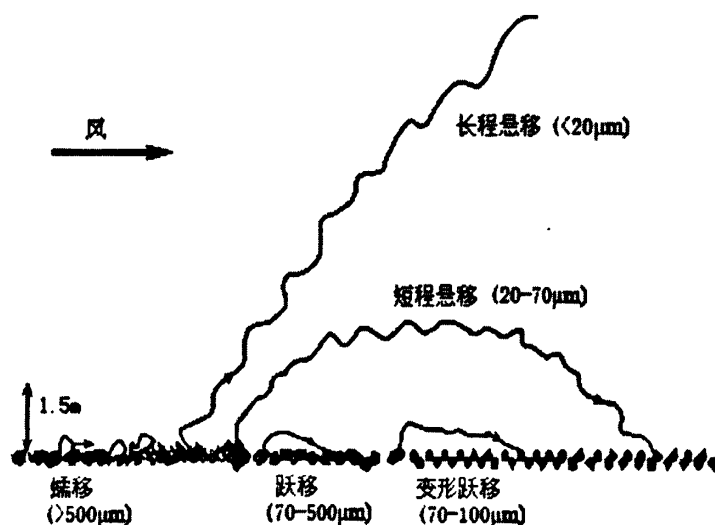


图2.2 沙粒运动形式示意图

2.3.1.2 沙粒受力情况分析

沙粒在气流中所受的作用力主要包括重力、压力梯度力、升力、拖曳力 (Stokes 粘性阻力)、附加质量力、Basset 力、Magnus 力和 Saffman 力。其中，升力、附加质量力和 Basset 力在沙粒所受的合力中所占的比例很小，计算时一般可以忽略不计。

假定：沙粒为均匀球体，密度为 ρ_p ，直径为 D ，流体的密度为 ρ ， U 、 U_p 分别为气流和沙粒速度的张量分量， μ 、 ν 分别为流体的动力粘性系数和运动粘性系数，则沙粒在气流中所受的主要作用力表述如下：

(1) 重力：

$$F_G = \frac{1}{6} \pi \rho_p D^3 g \quad (2.15)$$

(2) 压力梯度力：

$$F_T = \frac{1}{6} \pi D^3 \rho \frac{dp}{dy} \quad (2.16)$$

(3) 升力

升力是一种形状阻力(垂向), 对于圆球状颗粒, 升力系数为0。对于群体沙粒运动而言, 平均升力为零。

(4) 拖曳力(Stokes 粘性阻力):

由于沙粒与气流的相对运动而产生, 是沙粒运动的主要驱动力, 方向与沙粒相对气流的运动速度方向相反。

根据 Stokes 阻力公式:

$$F_D = 3\pi\mu D(U - U_p)(\text{Re}_p < 1) \quad (2.17)$$

当 $\text{Re}_p > 1$ 时, 可以采用标准阻力公式将拖曳力 F_D 表达为

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{8} \rho \pi D^2 |U - U_p| (U - U_p) \alpha \quad (2.18)$$

(5) 附加质量力

附加质量力是表示沙粒相对无粘流场作加速运动时, 也要带动或推动一部分流体作相同加速度的非恒定运动, 这部分似乎附着于沙粒上的流体体积正好等于沙粒体积的一半, 即

$$F_A = \frac{1}{12} \pi D^3 \rho \frac{d(U - U_p)}{dt} \quad (2.19)$$

(6) Basset 力

由于气流的非恒定性运动, 沙粒在其中运动时会对过去的加速过程产生记忆效应, 为此引入一个反映历史过程的作用力

$$F_B = \frac{3}{2} D^2 \sqrt{\rho\pi\mu} \int_0^t \frac{d(U - U_p)}{\sqrt{t - \tau}} d\tau \quad (2.20)$$

表示沙粒相对流体非恒定运动时所受的附加粘性作用的时间积分。

(7) Magnus 力

由沙粒的旋转产生。

$$F_M = \frac{1}{8} \pi D^3 \rho (U - U_p) \left(\omega - \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \quad (2.21)$$

(8) Saffman 力

在慢速切变流中小球受垂直于流动方向的力。

$$F_s=1.615\mu(U-U_p)D^2\sqrt{\frac{\partial U}{\partial y}\div v}$$

(2.22)

2.3.1.3 沙尘暴等级分布

按照《沙尘暴天气等级》规定^[36]，沙尘天气可以分为浮尘、扬沙、沙尘暴、强沙尘暴和特强沙尘暴五大类。而根据最大风速与最小能见度，沙尘暴又可以划分为四个等级，如表 2.1 所示。

表2.1 沙尘暴等级规定

等 级	瞬间极大风速(m/s)	最小能见度(m)
特强	≥10 级， ≥25	≤50
强	≥8 级， ≥20	≤200
中	6~8 级， ≥17	200~250
弱	4~6 级， ≥10	500~1000

2.3.2 风速、沙粒直径及导线选择

2.3.2.1 风速选择

地球表面通过地面的摩擦对空气水平运动产生阻力，从而使气流速度减慢，该阻力对气流的作用随高度的增加而减弱，当超过了某一高度之后，就可以忽略这种地面摩擦的影响，气流将沿等压线以梯度风速流动，称这一高度为大气边界层高度或者边界层厚度，用δ表示^[37]。在边界层以上的大气称为自由大气，以梯度风速流动的起点高度称作梯度风高度，用z_G表示，梯度风速用v_{z_G}表示，见图

2.3。

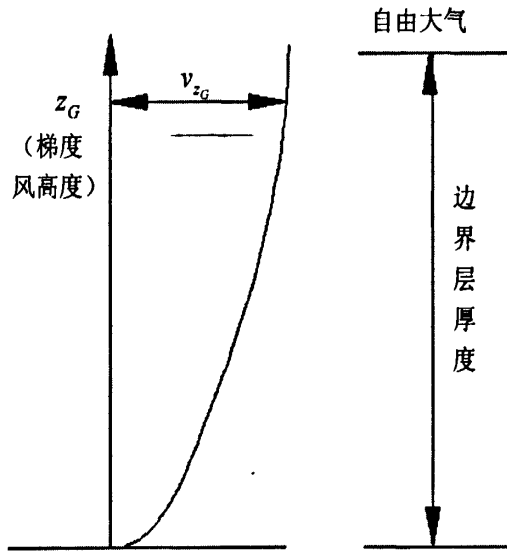


图2.3 大气边界层

一般情况下，大气边界层内近地层的气流式是湍流，湍流掺混使地表阻力的影响扩展到大气边界层的整个区域。这一厚度延至几百米以上，其高度大小与风力、地面粗糙度和纬度有关。在自由大气中的风流动是层流，基本上是沿等压线以梯度风速来流动的。

我国《建筑结构荷载规范》采用指数分布式^[38]：

$$\bar{v}(z) = \bar{v}_{10} \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha \quad (2.23)$$

式中：

$\bar{v}(z)$ —— z 高度处的平均风速；

$\bar{v}_{10}$ —— 10 m 参考高度处的平均风速；

α ——地面粗糙度系数。

《建筑结构荷载规范》把地貌分为 A、B、C、D 四类，不同的地貌对应于不同的地面粗糙度系数及相应的梯度风高度 H_T 。包围在地球外部的一层气体总称为大气或大气圈，大气圈以地球的水陆表面为其下界，称为大气层的下垫面。

表2.2 各类地貌下的粗糙度系数和梯度风高度类

类别	下垫面性质	α	H_T / m
A	近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区	0.12	300
B	田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的乡镇和城市郊区	0.16	350
C	有密集建筑群的城市市区	0.22	400
D	有密集建筑群且房屋较高的城市市区	0.30	450

本文选取的地区为新疆沙漠地区环境，故地貌类别为 A。《建筑结构荷载规范》中把 A 类地貌高度 50 年一遇 10 分钟的最大平均风速作为该地区的基本风速。

根据《110 KV~750 KV 架空输电线路设计规范》中规定^[39]，高压输电线路距离路面的垂直距离不低于 7m。对于浮尘和扬沙天气来说，对应风力较小，一般在 4 级以下，此时地表沙尘难以跃起，空气中的沙尘含量相对较小。考虑到实际情况的工程意义，本文确定的风速范围为 10~20m/s，对应的是中等沙尘暴及以下等级气候。8 级风以上的沙尘暴气候出现概率比较小，而且对输电线路的破坏可能以力学破坏占主导。

2.3.2.2 粒径及沙尘浓度选择

监测结果表明，在强风及沙尘暴过境时，尽管毫米级直径的沙粒也会被吹起，但其基本滞留在靠近地表层，发生跃移，只有粒径处于 100 μm 以下的颗粒有可能到达高压架空线路的高度而对输电线路产生影响，根据图 2.2，取数值模拟粒径为 20 μm 、50 μm 和 100 μm 。

根据沙尘暴天气分级标准规定(表 2.3)，本文选择 TSP 为 8mg/m³。

TSP (Total Suspended Particulate)：即总悬浮微粒，又称总悬浮颗粒物，指用标准大容量颗粒采集器在滤膜上收集到的颗粒物的总质量。粒径小于 100 μm 的称为 TSP，即总悬浮颗粒物；粒径小于 10 μm 的称为 PM10，即可吸入颗粒，PM10 为 TSP 的一部分。

表2.3 沙尘暴天气分级

沙尘天气 分级	TSP 浓度限值 (小时值) / $g \cdot m^{-3}$	PM10 浓度限值 (小时值) / $g \cdot m^3$	持续时间
一级沙尘天气（浮尘）	$1.0 \leq TSP < 2.0$	$0.60 \leq PM10 < 1.00$	≥2 小时
二级沙尘天气（扬沙）	$2.0 \leq TSP < 5.0$	$1.00 \leq PM10 < 2.00$	
三级沙尘天气（沙尘暴）	$5.0 \leq TSP < 9.0$	$2.00 \leq PM10 < 4.00$	≥1 小时
四级沙尘天气（强沙尘暴）	$TSP \geq 9.0$	$PM10 \geq 4.0$	

2.3.2.3 导线选择

本文选用的导线为 LGJ-500/65 与 LGJ-300/25 钢芯铝绞线，导线实体见图 2.4 和图 2.5。产品结构及主要技术参数如表 2.4。

表2.4 产品结构及主要技术参数

标称截 面 mm ²	根数/直径 mm		外径 mm	拉断力 N	计算重量 Kg/Km	交货长 度 ≥ m	载流量 A	
	铝 A	钢 St					70℃	90℃
500/65	54/3.44	7/3.44	30.96	154000	1897	1500	675	980
300/25	48/2.85	7/1.95	23.76	83410	1058	2000	505	725



图2.4 LGJ-500/65钢芯铝绞线



图 2.5 LGJ-300/25 钢芯铝绞线

2.3.3 风沙气固两相流模型建立

本文采用的计算软件是 FLUENT。FLUENT 软件^[40]是目前市场上最流行的 CFD 软件，由美国 ANSYS 公司开发，具有丰富的物理模型、先进的数值计算方法和强大的后处理功能，所以得到了广泛的应用。其模拟能力可以从机翼空气流动到熔炉燃烧，从旋转机械到多相流系统等非常多领域的应用。FLUENT 利用有限体积法对控制方程进行离散，且能提供完整的弹性网格，通过可以生成复杂的几何体的网格来解决流动问题。支持的网格种类包括 2D 的三角形、四边形，3D 的四面体、六面体、菱形和楔形，以及混合网格。该软件也允许为了解决流动问题而使网格变圆滑或者粗糙。该软件是用 C 语言写出的，并充分地利用了这种语言良好的灵活性和通用性。GAMBIT 是 FLUENT 软件的前处理软件，用于网格的生成，可生成 FLUENT 直接使用的网格模型，是具有超级组合建构模型能力的专用前处理器。

2.3.3.1 计算场域及边界条件

由于输电线有足够的长度，因此输电线表面的电场只要考虑环绕输电线截面的电场即可，本文建立了二维模型来计算风沙气固两相流流场。位于大气边界层中的输电导线，空气对其绕流时，处于一个完全开口的流动风场中，但空气对导线作用的影响具有一定的范围，在数值模拟时，给定有限的空间区域来计算。

计算流域尺寸： 2.8m （长） $\times 1.6\text{m}$ （宽）。计算流域如图 2.6 所示，边界条件如表 2.5 所示。

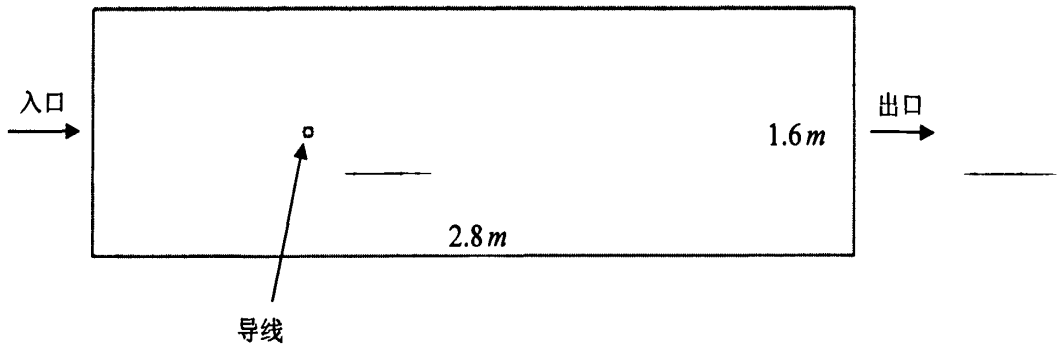


图2.6 模型的计算流域

网格划分时，使用结构化网格（map），进行分区域划分，以保证仿真的精度，导线周围网格划分相对较密。两个计算模型网格的总数量分别为 657500 和 659600。网格图如下：

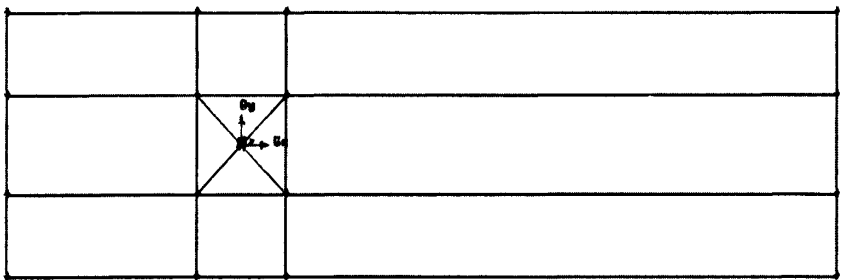


图2.7 场域网格分区域划分

表2.5 边界条件

入口边界	速度入口（velocity-inlet）， 指数率风速剖面，UDF 实现
出口边界	压力出口（pressure-outlet）
壁面条件	无滑移边界（wall, no slip）

假定沙粒为均匀球体；颗粒速度与风场速度相同，没有相对滑移；颗粒在空间均匀分布，不随高度变化。具体的参数设置如表2.6：

表2.6 沙粒相参数

TSP (mg/m^3)	沙粒粒径 (um)	沙粒体积分数 (10^{-3})	密度($10^3 kg/m^3$)
8	20	11.3	2.65
8	50	4.53	2.65
8	100	2.26	2.65

2.3.3.2 计算模型选择

为了得到输电导线周围的沙粒的浓度分布，本文使用双流体模型中的欧拉模型两相流来计算，以得到沙粒的体积分数，因为欧拉模型能够模拟颗粒悬浮情况，且其模型中各相被处理为互相贯穿的连续介质，能够很好的模拟气固二相流，并且得到各相的体积分数。欧拉模型对第二相沙粒的体积分数没有要求，只对计算的内存及收敛行为受到限制。

为了能够得到沙粒在随风运动的情况下，其流线在理论情况下的分布情况，本文使用颗粒轨道模型的离散相模型(DPM)进行模拟。FLUENT 中，在使用 DPM 模型时，第二相的粒子的体积分数必须小于 10%，内部颗粒间的距离大于颗粒直径两倍，因此，颗粒间的相互作用可以忽略。本文的三种风速下的沙粒体积分数都达到模型的使用要求，所以可以选用 DPM 模型^[41]。

2.3.3.3 计算模型的参数

流体介质是空气，具有不可压缩性，密度为常数，材料参数选用缺省值。气体流动为非稳态湍流，湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型。不考虑热交换，即屏蔽能量方程。对流项迎风格式采用 QUICK 格式，流场求解方法采用 SIMPLEC 算法。欠松弛因子采用缺省值。

DPM 模型中，当颗粒与壁面发生碰撞时，将会发生下述几种情况：

- (1) Reflect (反射)：颗粒发生弹性或非弹性碰撞反射；本文中，沙粒与导线的碰撞模型应为 reflect。
- (2) Escape (逃逸)：穿过壁面而逃逸（颗粒的轨道计算在此处终止)；
- (3) Trap (诱捕)：在壁面处被捕集。非挥发性颗粒在此处终止计算；颗粒或液滴中的挥发性物质在此处被释放到气相中；
- (4) Wall-jet (壁面射流)：穿过内部的诸如辐射或多孔介质间断面区域。

2.4 数值模拟结果及分析

2.4.1 数值模拟结果

欧拉模型计算的两种直径导线情况下 3 种风速及 3 种粒径下的输电导线周围沙粒体积分数分布结果见以下图：

1 号输电导线周围沙粒体积分数分布图：



图2.8 沙粒体积分数分布
($d = 20\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

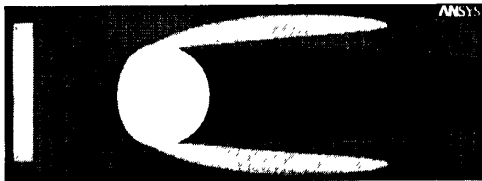


图2.9 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 20\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

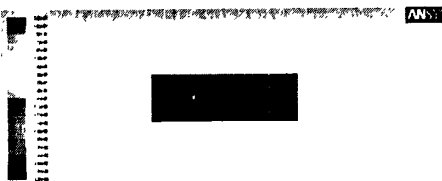


图2.10 沙粒体积分数分布
($d = 20\mu m$ 、 $v = 15m/s$)

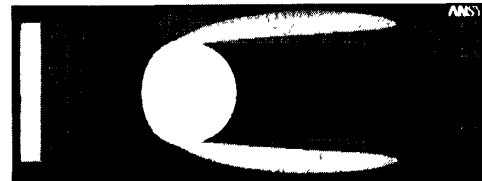


图2.11 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 20\mu m$ 、 $v = 15m/s$)

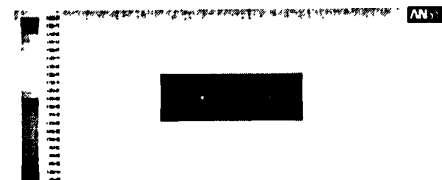


图2.12 沙粒体积分数分布
($d = 20\mu m$ 、 $v = 20m/s$)

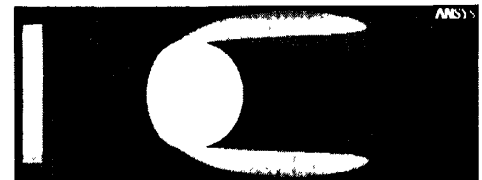


图2.13 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 20\mu m$ 、 $v = 20m/s$)

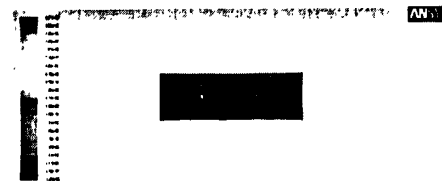


图2.14 沙粒体积分数分布
($d = 50\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

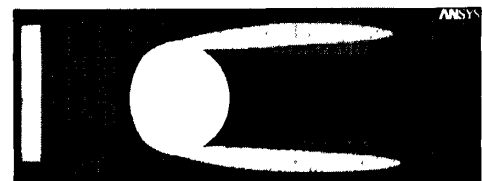


图2.15 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 50\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

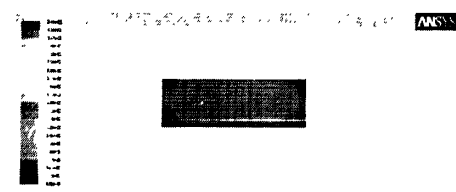


图2.16 沙粒体积分数分布
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=15\text{m/s}$)

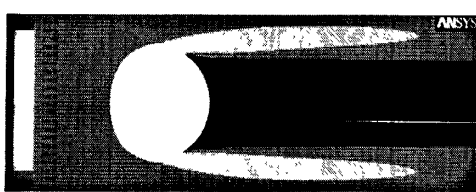


图2.17 沙粒体积分数分布局部放大
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=15\text{m/s}$)



图2.18 沙粒体积分数分布
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)

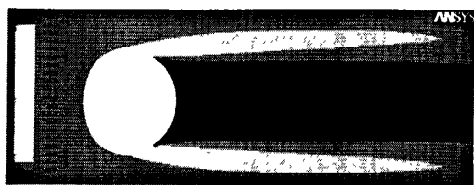


图2.19 沙粒体积分数分布局部放大
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)

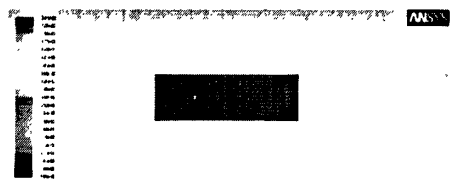


图2.20 沙粒体积分数分布
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=10\text{m/s}$)

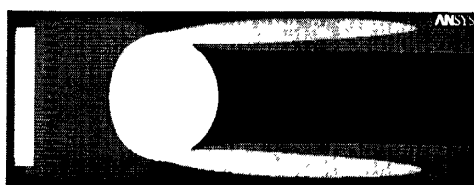


图2.21 沙粒体积分数分布局部放大
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=10\text{m/s}$)

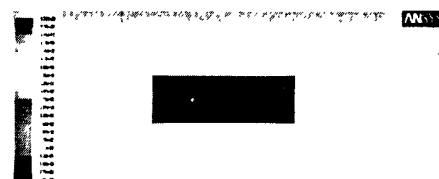


图2.22 沙粒体积分数分布
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=15\text{m/s}$)

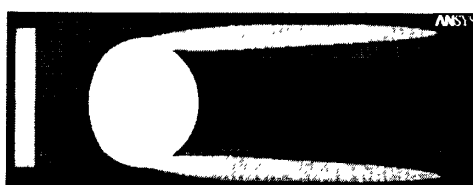


图2.23 沙粒体积分数分布局部放大
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=15\text{m/s}$)

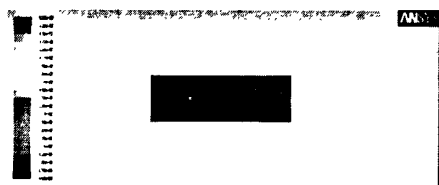


图2.24 沙粒体积分数分布
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)



图2.25 沙粒体积分数分布局部放大
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)

2号输电导线周围沙粒体积分数分布图:

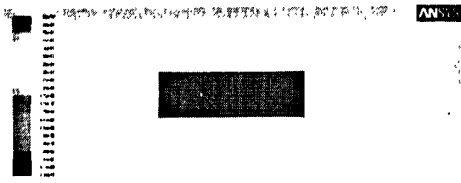


图2.26 沙粒体积分数分布
($d = 20\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

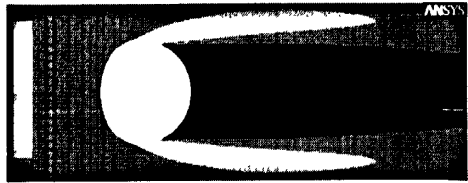


图2.27 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 20\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

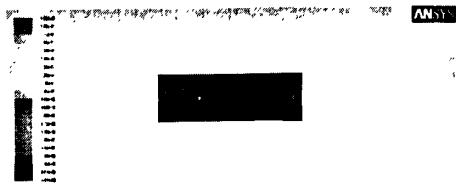


图2.28 沙粒体积分数分布
($d = 20\mu m$ 、 $v = 15m/s$)

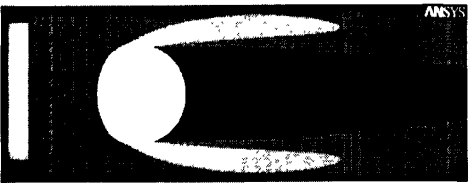


图2.29 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 20\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

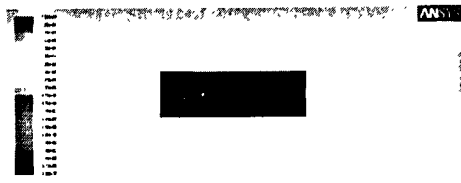


图2.30 沙粒体积分数分布
($d = 20\mu m$ 、 $v = 20m/s$)

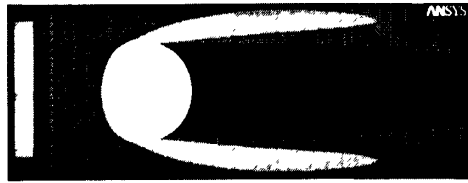


图2.31 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 20\mu m$ 、 $v = 20m/s$)

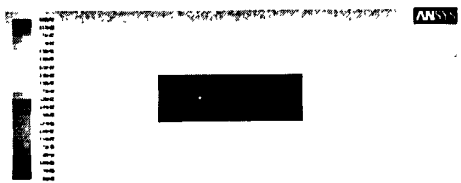


图2.32 沙粒体积分数分布
($d = 50\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

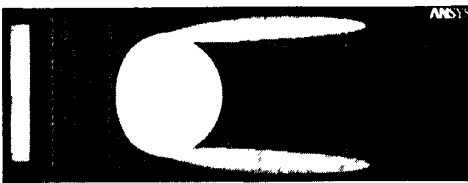


图2.33 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 50\mu m$ 、 $v = 10m/s$)

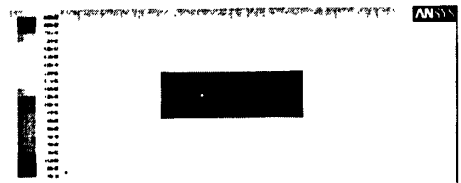


图2.34 沙粒体积分数分布
($d = 50\mu m$ 、 $v = 15m/s$)

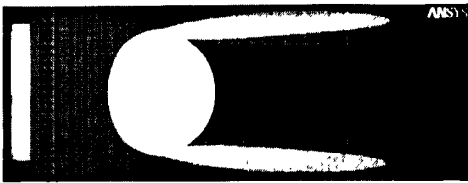


图2.35 沙粒体积分数分布局部放大
($d = 50\mu m$ 、 $v = 15m/s$)

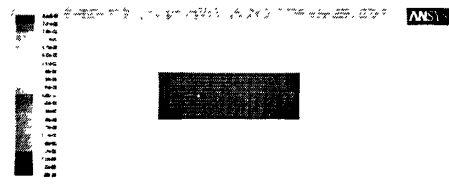


图2.36 沙粒体积分数分布
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)

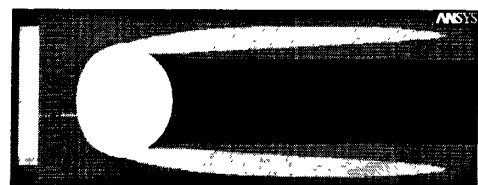


图2.37 沙粒体积分数分布局部放大
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)



图2.38 沙粒体积分数分布
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=10\text{m/s}$)

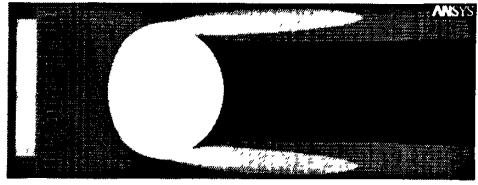


图2.39 沙粒体积分数分布局部放大
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=10\text{m/s}$)

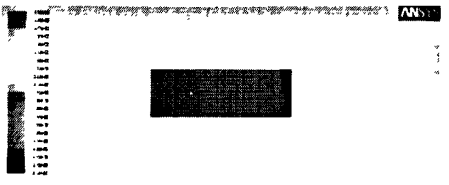


图2.40 沙粒体积分数分布
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=15\text{m/s}$)

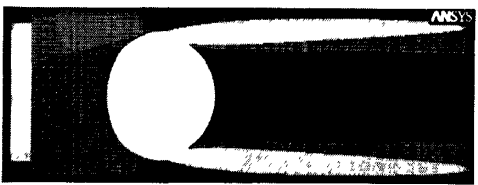


图2.41 沙粒体积分数分布局部放大
($d=50\mu\text{m}$ 、 $v=15\text{m/s}$)

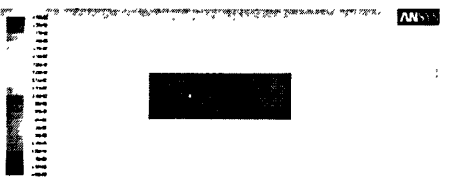


图2.42 沙粒体积分数分布
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)

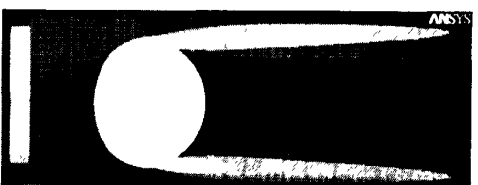


图2.43 沙粒体积分数分布局部放大
($d=100\mu\text{m}$ 、 $v=20\text{m/s}$)

DPM 计算模型得到的沙粒流线的结果见图 2.44 和图 2.45:

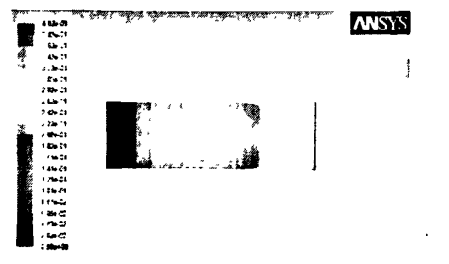


图2.44 流场整体流线随停留时间分布

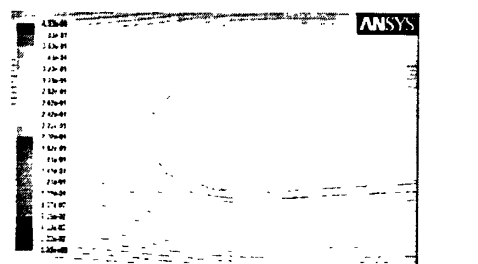


图2.45 输电线周围沙粒流线

2.4.2 结论

1. 欧拉模型

从欧拉模型计算结果中可以看出,不同风速下,整个流场沙粒的分布大体相似。在导线前端出现沙粒的堆积,导线后端出现一段无沙粒区域。

在同等粒径情况下,随着风速的增大,输电导线前端堆积沙粒的体积分数略有减小。在相同风速情况下,随着粒径的增大,输电导线前端堆积沙粒的体积分数减小。在相同粒径及风速情况下,较粗输电导线前端堆积沙粒的体积分数略大于较细输电导线。

2. DPM 模型

从 DPM 模型计算结果中可以看出,计算场域中处于上部分与下部分的沙粒,其流线基本未受输电导线的干扰,跟随空气流动。而中间部分的沙粒由于与导线相碰撞而产生反弹,而后又受到空气的作用力,继续跟随空气绕过输电导线而继续向前运动。输电导线后端也出现无沙粒区域。

2.5 本章小结

(1) 介绍了流体动力学的基本知识及多相流的数值模拟方法,选用了欧拉模型及 DPM 模型对风沙气固两相流进行计算。

(2) 根据相关规范,选取 TSP 为 $8\text{ mg}/\text{m}^3$,风速为 10 m/s 、 15 m/s 和 20 m/s ,粒径为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 和 $100\text{ }\mu\text{m}$ 情况进行计算,计算了不同导线直径情况下的气固两相流流场,得到了输电导线周围沙粒的体积分数的分布及沙粒流线分布。

第三章 高压输电导线周围电场计算

3.1 高压输电线路电晕放电的产生

在极不均匀电场中, 间隙中的最大场强与平均场强相差很大, 以至于外加电压及其平均场强还较低的时候, 曲率半径较小的电极附近空间的局部场强已很大, 在这局部场强区的空气会首先发生自持放电, 出现放电声和淡蓝色的光环, 称为电晕放电现象^[42-44]。

我国高压输电系统近年来不断的发展, 输送的容量也不断的在扩大, 电晕放电也不可避免地会随之产生。在高压架空电力线路中, 输电导线产生的电场强度超过了空气的击穿强度时, 就导致输电导线周围的空气电离而呈现局部放电现象。输电导线放电现象会导致高压输电线路产生短路, 继而会引发高压输电网的大面积停电。

可见, 输电导线放电现象的产生与导线表面的电场强度, 特别是导线表面的最大电场强度有着很密切的关系, 所以对高压输电导线电场分布进行研究很有必要。

3.2 输电导线电场强度分布计算

3.2.1 电磁场理论基础

电磁场满足麦克斯韦 (Maxwell) 方程组^[45]:

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (3.4)$$

式中:

$\nabla \times$ ——旋度算子;

$\nabla \bullet$ ——散度算子;

$\{H\}$ ——磁场强度矢量;

$\{J\}$ ——总的电流密度矢量;

$\{J_s\}$ ——外施激励源电流密度矢量;

$\{J_e\}$ ——感应涡流密度矢量;

$\{J_v\}$ ——速度电流密度矢量;

$\{E\}$ ——电场强度矢量;

$\{B\}$ ——磁感应强度矢量;

D ——点位移矢量;

t ——时间;

ρ ——体电荷密度。

电流连续性方程:

$$\nabla \bullet \left[\{J\} + \frac{\partial D}{\partial t} \right] = 0 \quad (3.5)$$

3.2.2 电场强度计算方法

本文在进行计算时,对输电导线做了如下简化:输电线是半径相同、彼此平行的,对大地平行的无限长光滑导体,导线电压已知,电荷分布沿线路无畸变,忽略杆塔及周围邻近物体和弧垂的影响。高压输电线路是在工频 50 Hz 的交流电压下工作的。人们一般所说的输电线路电压也就是其相间电压。电压随时间的变化比较缓慢,计算空间远小于相应电磁波的波长(50 Hz 交流电产生的工频电磁场的波长为 $66 \times 10^6 \text{ m}$)。所以在一般状况下,输电线附近工频电磁场可以近似地认为是稳定的,即可以按静电场来分析^[46]。经过简化后,电场的计算可以按二维静电场来处理。

1. Markt-Mengele 法

马克特 (Markt) - 门格尔 (Mengele) 法,有时称曼格尔特 (Mangoldt) 法,也是国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 推荐的一种计算分裂导线表面场强的方

法。使用虚拟的单根导线等效代替分裂导线，使用麦克斯韦点位系数法求出等效导线的总电荷量，再将总电荷量平均的分配在分裂导线上，由此可得，分裂导线中子导线的平均表面电场强度，而后即可求出导线任意处的电场强度。

2. 逐步镜像法

逐步镜像法^[47]的基本原理是：在一个多导体组成的输电体系中，用一系列置于该导体内的镜像电荷来代替每一个导体，使导线表面维持等电位。这样就可根据这些镜像电荷来计算导体表面的电场。用此方法计算分裂导线表面电位梯度时，每根子导线是单独处理的，所以，每根子导线所处位置的不同都能够被考虑到。此方法中，导线彼此间及大地和架空地线的影响都会被计算到，是一种相对比较精确的计算方法。

3. 模拟电荷法 CSM(Charge Simulation Method)

模拟电荷法^[48]是基于电磁场唯一性定理，用一组离散化的模拟电荷等值替代电极表面连续分布的自由电荷或介质分界面上连续分布的束缚电荷。只要这组电荷能保证原来给定的边界条件不变，就可以利用叠加原理将离散的模拟电荷在空间所产生的场量进行叠加，得到与原连续分布电荷等效的空间电场分布。模拟电荷法可用于计算高压电极、高压输电线和其它高压电器附近的高压电场。

4. 有限元法 FEM (Finite Element Method)

有限元法^[49]的基本思路是“化整为零，积零为整”。其求解步骤是：将连续的结构散成有限多个单元，并在每个单元中设定有限多个节点，将连续体看作是只在节点处相连接的一组单元的集合体；然后选定场函数的节点值作为基本未知量，并在每一个单元中假设一个近似的插值函数以表示单元中场函数的分布规律；进而利用变分原理建立用以求解节点未知量的有限元方程，从而将一个连续域中的无限自由度问题化为离散域中的有限自由度问题。求解结束后，利用解得的节点值和设定的插值函数确定单元上以至整个集合体上的场函数。

以一个齐次第一类边界条件的泊松方程为例：

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

$$\varphi|_s = 0 \quad (3.7)$$

式中：

φ ——电位，定义域为 V ；

S ——定义域 V 的闭合边界；

ρ ——空间电荷密度。

此泛定方程与下变分问题等价，且有唯一解：

$$F(\varphi) = \iint_V \left[\varepsilon \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \varepsilon \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - 2\rho\varphi \right] dx dy = \min \quad (3.8)$$

基于有限元法的变分原理，用有限元法来求解泊松方程。基本计算过程主要分以下步骤：

(1) 确定实际问题所定义的区域、激励和边界条件，根据实际情况决定问题的描述方程；

(2) 对整个计算区域离散化，即将区域用节点和有限元（二维场通常为三角或四边形单元）表示，并对它们按次序编号，并选取相应的差值函数；

(3) 把变分问题离散化为一个多元函数的极值问题，导出一组联立的代数方程组（有限元方程）；

(4) 选择适当的代数解法，解有限元方程组，得出各节点的数值解（即电位值）；

(5) 根据各节点的电位值求出电场强度。

有限元法克服了解析法的局限，能考虑任意塔型和导线布置，得到空间中任一点的电场强度数值解。具有能够适应场域边界几何形状以及媒质物理性质变异的能力，可编写通用计算程序，使之构成模块化的子程序集合，适应计算功能拓展的需要。

但是，有限元法在计算输电线路的产生的电场时，边界除了导线表面和地面，还需要增加一个人工边界，以确定计算的场域。

3.3 输电导线电晕放电的起始场强

输电导线开始出现电晕时的电压称为电晕起始电压，此时电极表面的场强称为电晕起始场强。

实际情况中的电气设备的绝缘结构比较复杂，电极形状与表面的状态，以及

各种因素的影响相差很大,准确计算电晕起始电压十分困难,因此工程上一般采用皮克(F.W.Peck)经验公式来计算电晕起始场强与起始电压。

对于输电线路,其电晕起始场强 E_c (导线的表面场强,峰值)的经验表达式为^[50]:

$$E_c = 30m_1m_2\delta\left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{r\delta}}\right) \quad (KV/cm) \quad (3.9)$$

式中:

r ——输电导线的半径,单位 cm ;

δ ——空气的相对密度,换算公式为式 3.12;

m_1 ——导线表面粗糙系数,根据不同的情况,约在 0.8~1.0 之间,光滑导线取 1;

m_2 ——气象系数,根据不同气象情况,约在 0.8~1.0 之间,好天气时取 1。

算得 E_c 后就不难根据电极布置求得电晕起始电压 U_c 。对于离地高度为 h 的单相导线可得出:

$$U_c = E_c \ln \frac{2h}{r} \quad (3.10)$$

对于距离为 D 的两根平行导线(D 远大于 r),可得出:

$$U_c = E_c \ln \frac{D}{r} \quad (3.11)$$

对于三相输电导线,上式中的 U_c 代表相电压, D 为导线的几何均距,

$$D = \sqrt{D_{12}D_{23}D_{31}}。$$

当气压或温度改变时,其结果都反映为空气相对密度 δ 的变化。空气的相对密度 δ 为实验条件下的密度与标准大气下的密度之比。空气的相对密度与大气压力成正比,与温度成反比,即

$$\delta = \frac{\delta_s}{\delta_0} = \frac{273+t_0}{273+t} \times \frac{p}{p_0} = 2.89 \times \frac{p}{273+t} \quad (3.12)$$

式中:

δ ——空气的相对密度;

p_0 ——标准大气压强，101.3 KPa；

t_0 ——大气常温，20℃；

p ——实际大气条件下的气压，单位 KPa；

t ——实际大气条件下温度，单位℃。

本文中，导线表面粗糙系数 $m_1=0.9$ ，晴天气象系数 $m_2=1$ ，沙尘暴天气气象系数 $m_2=0.9$ 。取标准大气压强及常温，即空气的相对密度 $\delta=1$ ，导线为单相导线。

3.4 输电导线周围场强计算

3.4.1 计算方法及单元类型

有限元法在求解开域问题时，须将场域由开域问题变为闭域问题求解，将无限大空间的问题限制在有限空间内。但是，如果将无限远处的零电位边界直接移至有限区域边界上，将会带来明显的计算误差。为减小计算误差，先利用镜像法来确定场域边界上的电位值，得到原问题的电位解，然后再用有限元法计算，这种耦合计算方法可弥补有限元法的缺陷^[51]。

有限元计算软件选择 ANSYS。ANSYS 软件^[52]是一个功能强大而灵活的大型通用软件。它融合结构、热、流体、电磁、声学于一体，广泛应用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械工程、土木工程等工业及科学研究。ANSYS 在计算电磁场时，是以 Maxwell 方程组为出发点的。有限元方法主要计算的未知量（也称自由度）主要是磁位或者电位。其他诸如电流密度、能量、损耗、电感和电容都可以由这些自由度导出。

ANSYS 中，静电场分析用以确定由电荷分布或外加电势所产生的电场和电场标量位（电压）分布。该分析能加载两种形式的载荷：电压和电荷密度。

静电场分析是假定为线性的，电场正比于所加电压。

模型使用的单元类型为：

表3.1 二维实体单元

单元	维数	形状或特征	自由度
PLANE121	2-D	四边形，八节点	每个节点上的电压

3.4.2 计算模型建立

3.4.2.1 导线及边界电压

根据镜像法，在与导线垂直的平面上设置二维 (x,y) 坐标系，设导线位于 (x_0,y_0) 处，导线半径为 r ，则任意一点 $p(x,y)$ 上的电位为：

$$U=\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\sqrt{\frac{(x-x_0)^2+(y+y_0)^2}{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}$$

(3.13)

式中：

τ ——导线电荷密度， $=U_02\pi\varepsilon_0/\ln(2y_0)$ ；

y_0 ——导线距离地面的高度；

U_0 ——导线电压的有效值。

3.4.2.2 计算模型

根据《110~500KV 架空送电线路设计技术规程》中的规定^[53]，本文选择的高压输电导线直径分别为 30.96mm 和 23.76mm，为本文命名前者为 1 号导线，后者为 2 号导线。其电压及高度见表 3.2。

表3.2 导线参数

导线	导线直径/mm	导线距地面高度/m	导线电压/KV
1	30.96	30	500
2	23.76	20	330

空气的相对介电常数为 1。沙粒的介电常数为 3~5，本文选择的介电常数为 4。

为了验证计算场域的大小对电场强度最大值的计算结果的影响，使用有限元-镜像法计算出导线周围的最大场强值。表 3.3 给出了在晴朗天气情况下，不同场域半径时，1 号导线和 2 号导线周围最大场强的计算结果。

1.晴朗天气情况

晴朗天气情况下，空气中无沙粒及其他颗粒杂质存在。根据表 3.3 的结果，本文取模型的计算场域为以导线中心为圆心，半径为 1m 的圆来计算输电导线周围的场强分布。

使用 PLANE121 单元建立模型，在 ANSYS 中建立计算模型（图 3.1）。

表3.3 输电导线周围最大场强分布

场域半径(m) $E_{\max}$ (KV/cm) 导线	0.2	0.5	1	2
	1	22.718	22.756	22.77
2	13.575	13.454	13.347	13.347

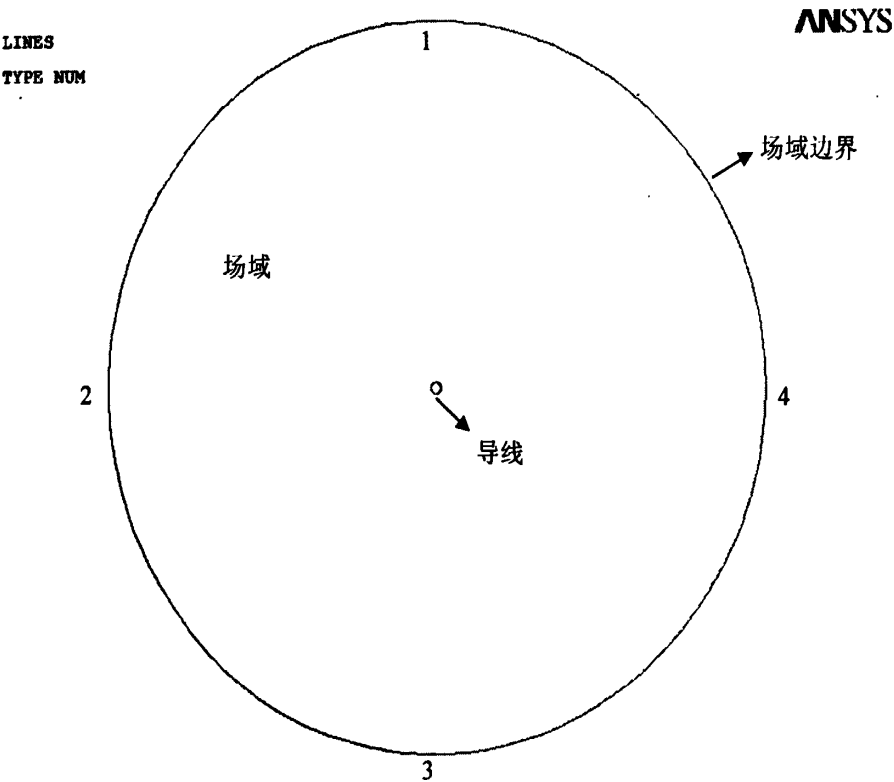


图3.1 计算场域及边界

根据镜像法，分别计算出 1 号导线和 2 号导线计算场域边界上 1、2、3 和 4 四个点的电压值（表 3.4）。

表3.4 输电导线边界点上电压

电压(KV) 导线 \ 点号				
	1	2	3	4
1	143.63	143.05	142.46	143.05
2	85.63	85.07	84.48	85.07

将计算场域进行网格划分，加载计算出的边界电压和导线电压，并将其扩展到其他节点（expand VOLT to nodes），导线电压的有效值为输送电压的 $1/\sqrt{3}$ 倍，及 500 KV 时，电压有效值为 288.68 KV；330 KV 时，电压有效值为 190.53 KV。定义场域中空气的相对介电常数，并进行计算。得到晴朗天下的场域的电场分布，（图 3.2 和图 3.3）。

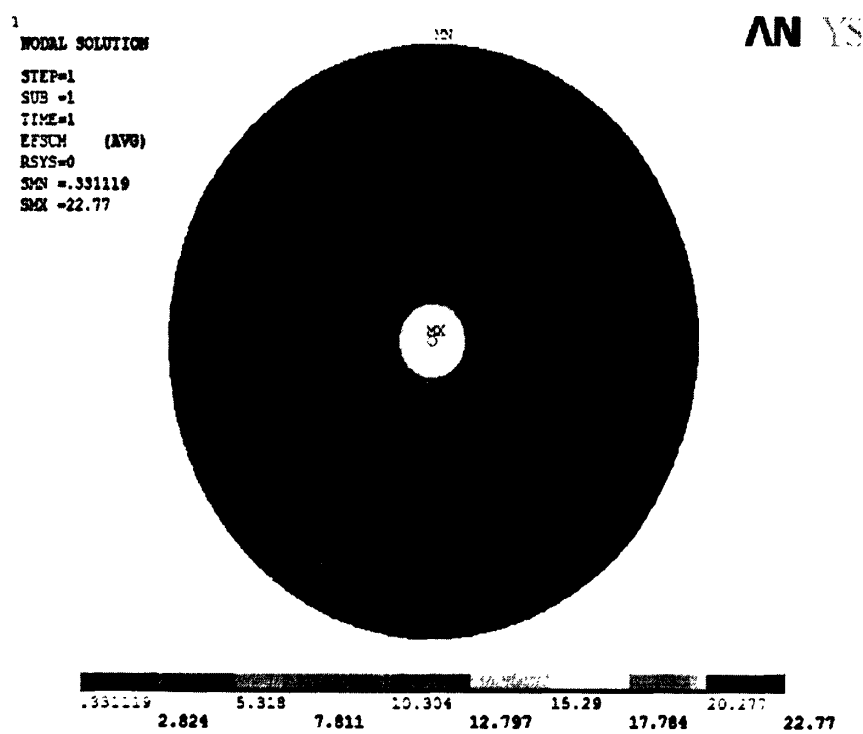


图3.2 晴朗天气下1号导线周围场强分布

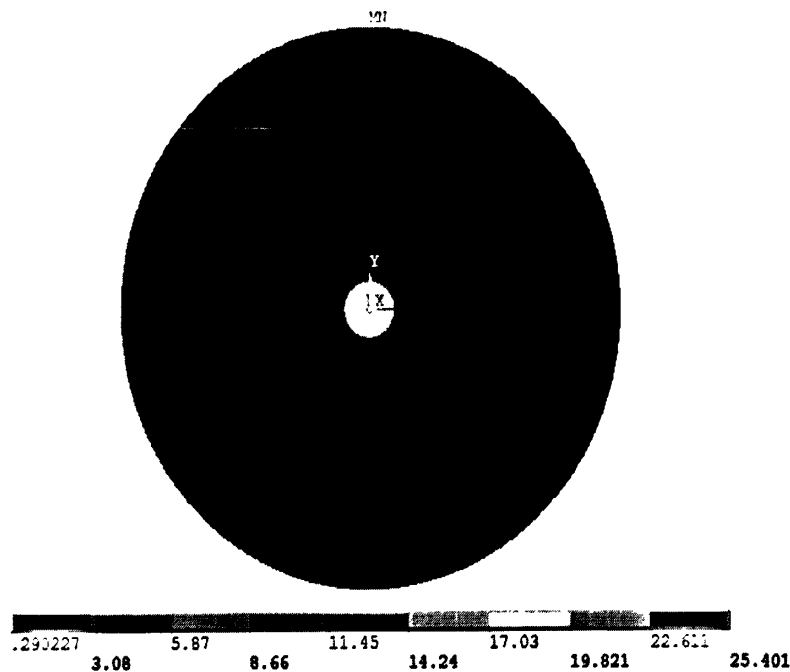


图3.3 晴朗天气下2号导线周围场强分布

根据皮克公式，天气晴朗条件下，导线半径为 30.96 mm 和 23.76 mm 时，导线的起晕电场强度分别为 $29.616\text{ KV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $30.41\text{ KV}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。

可见，在晴朗天气情况下，导线周围电场强度并未超过导线起晕电场强度值，即导线并未发生电晕放电现象。

2. 沙尘天气情况

本文气固两相流欧拉模型计算出了在特定风速、特定浓度下沙粒的体积分布情况。根据混合物介电常数计算公式，可以得出特定体积分数的风沙混合物的相对介电常数。

计算混合物相对介电常数的公式为：

$$\frac{\epsilon_1 - 1}{\epsilon_1 + 2}\eta_1 + \frac{\epsilon_2 - 1}{\epsilon_2 + 2}\eta_2 = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \tag{3-14}$$

式中：

ϵ_{1-2} ——混合物中一相物质的相对介电常数；

ϵ ——混合物的相对介电常数；

η_{1-2} ——物体在混合物中所占的体积分数。

为了简化流体的计算结果，本文将流场中沙粒的体积分数分为 4 个等级，以简化计算模型。面电荷密度根据黄宁等的实验得到的特定沙粒的荷质比及每个浓度等级所占的体积来确定（表 3.6），沙粒荷质比见表 3.7。

表3.6 2种粒径范围的“均匀沙”在不同风速下平均带电量的测量值

粒径/ <i>um</i>	风速/ <i>m•s⁻¹</i>	电荷量/ <i>μC•kg⁻¹</i>
0~75	7	-124.5
0~75	15	-40.2
100~250	7	-64.2
100~250	15	-3.6

表3.7 本文使用的不同风速下的平均带电量

电荷量(<i>uC/kg</i>) 粒径(<i>um</i>)	风速(<i>m/s</i>)		
	10	15	20
20	-80	-60	-40
50	-60	-40	-20
100	-40	-20	-5

根据气固两相流欧拉模型计算得到的流场，在 ANSYS 中建立沙尘环境下输电导线电场模型（图 3.4~3.5）。

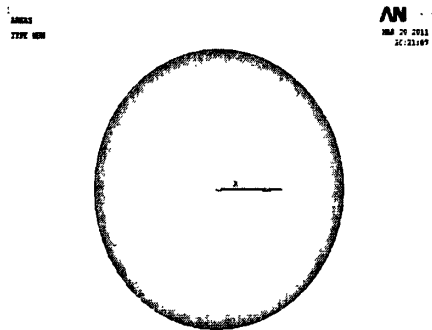


图3.4 ANSYS中模型图

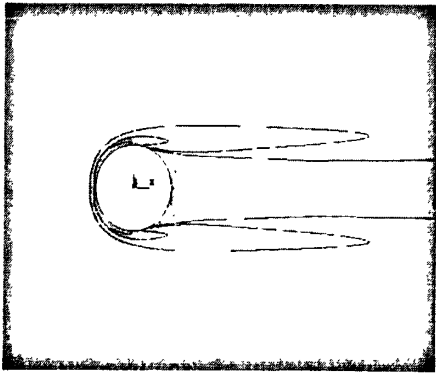


图3.5 导线周围模型局部放大图

3.4.3 计算结果及分析

在不同的区域添加相对应的介电常数以及面电荷密度，并进行计算，得到的计算结果见图 3.6 和图 3.7:

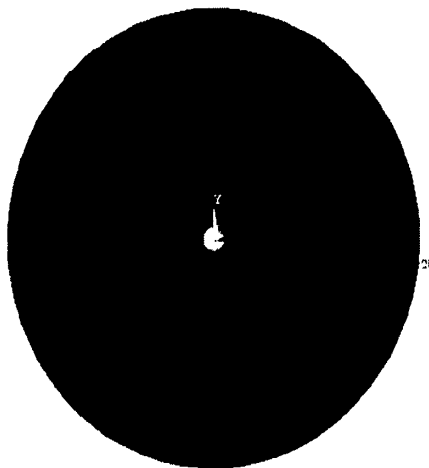


图3.6 场域中电场分布

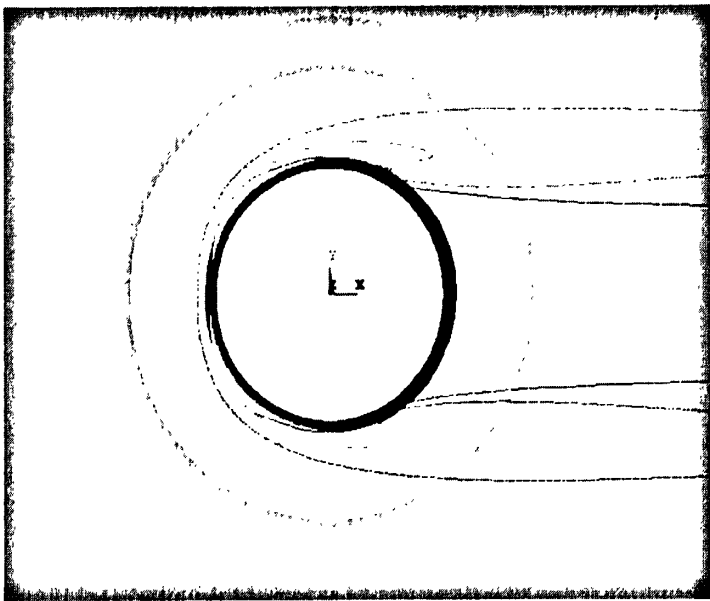


图3.7 导线周围电场分布局部放大

经过计算，得到了各种情况下导线周围的场强分布，其最大电场强度见表 3.8 和表 3.9:

表3.8 各种情况下1号导线周围最大场强值

$E_{\max}$ (KV/cm) 风速(m/s) 粒径(um)	10	15	20
20	49.765	49.734	49.696
50	48.729	48.692	48.689
100	48.332	48.329	48.328

表3.9 各种情况下2号导线周围最大场强值

$E_{\max}$ (KV/cm) 风速(m/s) 粒径(um)	10	15	20
20	35.837	35.816	35.79
50	35.162	35.147	35.143
100	34.874	34.87	34.861

将最大场强值分别与由皮克公式得到的输电线产生电晕的电场强度进行比较。经过比较得，各种情况下的电场强度值均大于导线的起晕电场强度值。可见，在沙尘环境下，两种型号的输电线将发生电晕放电现象。

3.4.4 结论

由以上结果，本文得出的沙尘暴过境的情况下高压输电导线产生电晕放电的机理为：沙尘暴通过高压输电导线时，由于沙粒的存在，输电导线周围的介质发生了改变，由于沙粒浓度分布不同，由空气和沙粒组成的介质的相对介电常数也不相同，且沙粒携带一定量的电荷，使得输电导线周围的电场分布发生了畸变，且最大电场强度值大于输电导线的起晕电场强度值，高压输电导线产生了电晕放电现象。

3.5 本章小结

简述了输电导线产生电晕放电的原理及电晕起始场强的经验公式，介绍了导线电场强度分布的计算方法，并选择有限元-镜像法计算高压输电导线电场分布。根据气固两相流欧拉模型计算得到的流场结果，在 ANSYS 中建立沙尘环境下的输电导线电场模型，得到了风速为 10 m/s、15 m/s 和 20 m/s，粒径为 20 μm、50 μm 和 100 μm 情况下的高压输电导线电场强度分布，并根据输电导线起晕场强的经验公式，初步揭示了高压输电导线在沙尘暴环境下产生电晕放电的机理。

第四章 输电导线周围沙尘分布的风洞实验

4.1 实验目的

为了验证本文中对风沙气固两相流数值模拟结果的正确性，本文通过风洞实验，并使用粒子图像测速法（PIV）技术，对不同风速情况下，对沙粒围绕输电导线的分布情况进行实验及分析。

4.2 风洞实验介绍

4.2.1 风洞实验的优点

风洞实验是风工程与工业空气动力学的一种主要研究方法。风洞实验具有现场测试方法的直观性，在人力、物力和时间上也比较节省，其运用也越来越广泛。通过风洞实验，可以在可控条件下开展复杂自然环境的科学规律研究，应用十分广泛，可承担的主要实验研究内容包括四个方面，即大气边界层内风特性的研究、风对建筑物和结构物作用的研究、风引起的污染扩散和质量迁移的研究、流体力学基础特性研究。因此，风洞实验在空气动力学的研究、各种飞行器的研制方面，以及在工业空气动力学和其他同气流或风有关的领域中，都有广泛应用。

风洞实验有以下优点：

- （1）风洞实验能比较准确地控制实验条件，如气流的速度、压力、温度等；
- （2）实验在室内进行，受气候条件和时间的的影响小，模型和测试仪器的安装、操作、使用比较方便；
- （3）实验项目和内容多种多样，实验结果的精确度较高；
- （4）实验比较安全，而且效率高、成本低。

4.2.2 风洞实验装置

本文的风洞实验在西部灾害与环境力学教育部重点实验室兰州大学多功能环境风洞实验室中完成（图 4.1 和图 4.2）。



图4.1 多功能环境风洞实验室

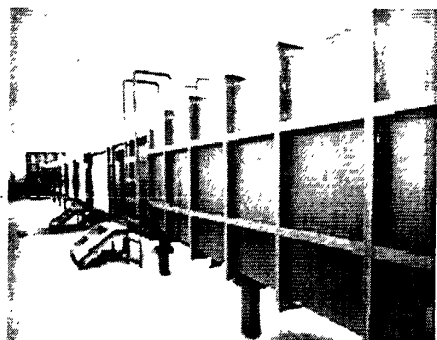


图4.2 风洞整体图

此多功能环境风洞为直流下吹式，由动力段、整流段、实验段和扩散段四部分组成。全长 85 m ，洞体长 55 m ，实验段长 20 m ，实验段截面积 1.3 m （宽） $\times$ 1.45 m （高），风速由 4 m/s 至 40 m/s 连续可调。

除底部外，风洞左、右两面均是透明的玻璃窗，便于在不同部位对实验进行实时的观察；在实验段的始端与末端均有铁质门，可以进入风洞内，便于在不同部位安装测试仪和装卸沙样；风洞的上部设有可封闭的窗口，便于放置 PIV 的激光器等。风洞的始端是制风设备，末端为出口，由电机带动叶片旋转产生风，并通过较长的缓冲匀速段进入风洞实验段，风速由风洞控制器控制（图 4.3），可检测风洞实验室内温度及湿度，转速可调。风速采用用毕托压差仪（毕托管）进行修正。

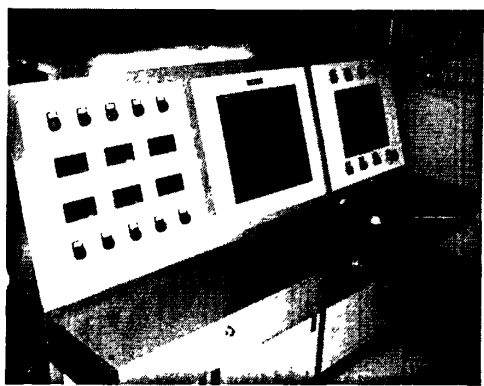


图4.3 风洞控制器

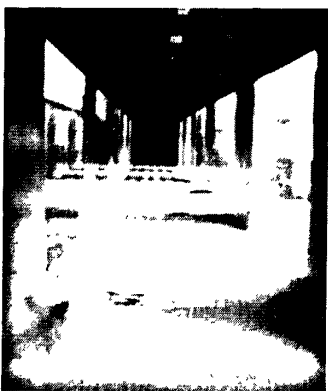


图4.4 风洞内部

风洞配置的测量仪器有 PIV 粒子动态分析仪、集沙仪、风沙电场实时数据采集系统、风场实时数据采集系统、高速摄影仪、六分力天平等。兰州大学多功能环境风洞设计合理，控制系统稳定可靠，流场品质符合相关技术指标要求，外形结构美观，是目前甘肃省内最大的风洞实验设备。

4.2.3 粒子图像测速法 PIV

粒子图像测速法 (Particle Image Velocimetry) 原理^[54-55]: 由已知时间间隔内流场中微小区域的位移计算出速度矢量。双脉冲激光器发出的时间间隔为 Δt 的激光脉冲, 通过光学透镜形成激光片, 形成厚度约为 1 mm 的片光源入射到流场待测区域。待测区域中已撒满适合的示踪粒子 (在本文中为沙粒), 激光照射到粒子上, 粒子便会散射或反射, 与待测区域垂直的拍摄相机 CCD 将拍摄到两次激光脉冲所形成的待测区域流场图。这两幅待测区域流场信息照片将通过数据传输线传给数据处理器, 处理器通过自相关或互相关统计技术算得每个点或区域在 Δt 时间内的位移, 就可以方便的得出每个点或区域的速度值, 这样就形成了原始的矢量图。再传输到装有处理软件的计算机进行后续处理得到待测流场的其它信息。特别提出的是双脉冲激光器和拍摄相机的动作是同步的。

相关分为自相关和互相关。对于互相关, 做相关处理的两幅图像是独立存在的。其优点是: 可以自动判别速度方向, 速度测量的范围也比自相关大得多。做互相关处理时, 图像中的计算区在另一图像中寻找其最大相似度的区域, 降低了相关处理中的背景噪声, 相关的有效粒数增加, 信噪比提高, 识别的准确度大大提高。

互相关分析方法函数为:

$$f(x, y) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) \bullet I_2(x + dx, y + dy), -\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2} \quad (4.1)$$

式中:

I_1, I_2 ——两次曝光的粒子图像的光强函数;

n ——每次查询区域的大小。

PIV 测速是基于最直接的流体速度测量方法, 是通过测量示踪粒子的瞬时平均速度实现对二维流场的测量。

在己知的时间间隔 Δt 内, 流场中某一示踪粒子在二维平面上运动, 它在 x 、 y 两个方向的位移是时间 t 的函数。该示踪粒子所在处质点的速度可以表示为:

$$v_x = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \bar{v}_x \quad (4.2)$$

$$v_y = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} = \bar{v}_y \quad (4.3)$$

式中:

v_x 、 v_y ——质点沿 x 、 y 方向的瞬时速度;

$\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_y$ ——质点沿 x 、 y 方向的平均速度;

Δt ——测量的时间间隔。

上式中, 当 Δt 足够小时, $\bar{v}_x$ 、 $\bar{v}_y$ 的大小可以精确的反应 v_x 、 v_y 。

PIV 激光原理图如下:

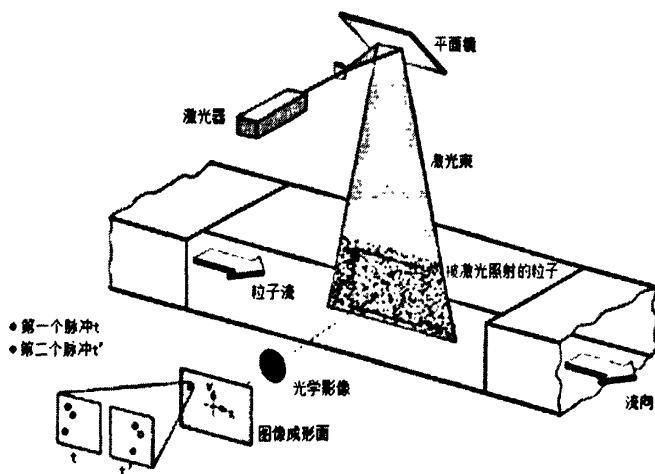


图4.5 PIV原理示意图

PIV 系统通常由激光器、数字照相机、控制器、图像处理软件等部分组成(图 4.6~4.9)。

(1) 脉冲激光器

脉冲激光器的型号为双脉冲 Nd:YAG 脉冲激光器, 每次输出的激光脉冲能量为 $2 \times 120 \text{ mJ} / \text{Pulse}$, 激光通过光路装置形成片光, 照射到预定的测试区域。由于 CCD 相机对于蓝光和绿光最敏感, 所以 Nd:YAG 激光器输出波长为 532 nm 的绿光激光束。双谐振脉冲式激光器内部有两个激光器可以输出间隔可调的双脉冲激光片, 工作频率为 15 Hz , 光脉冲宽度 $3 \sim 5 \text{ ns}$ 。脉冲激光采用 Qswitch 触发方式获得, 脉宽 8 ns , 输出的激光片厚度为 1 mm 左右(图 4.6)。

(2) CCD 数字照相机

CCD 数字照相机型号为 2 套 639959 型号，分辨率为 1600×1192 ，4M 像素自/互相关数字 CCD 相机，16 帧/秒，最短跨帧时间 200 ns ，高信噪比，带 CCD 激光防护阵列，12 位输出，Nikon 50mm/F1.8 镜头，数据传输速率不小于 400 M/s ，CCD 镜头前安装了一块滤光镜，以降低光线对拍摄图像的影响（图 4.7）。

(3) 同步控制器：

同步器控制器型号为 610035，控制激光器与照相机同步工作，外触发信号输出可以控制其他外部设备，延时精度小于 15 ns （图 4.8）。

(4) 图像处理软件 Insight3G:

负责对采集图像的分析处理工作，生成各种矢量数据以及流场图谱等。实时显示采样图像，在线显示矢/标量场（图 4.9）。

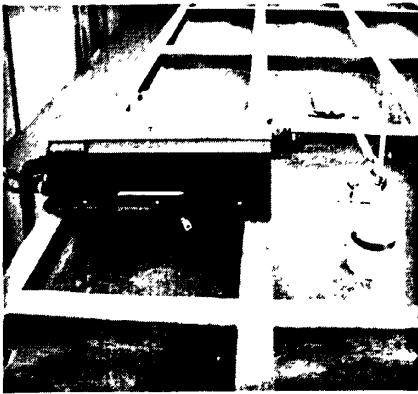


图4.6 激光器及平面镜

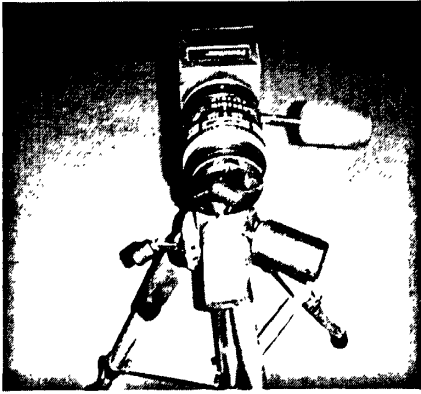


图4.7 数字照相机

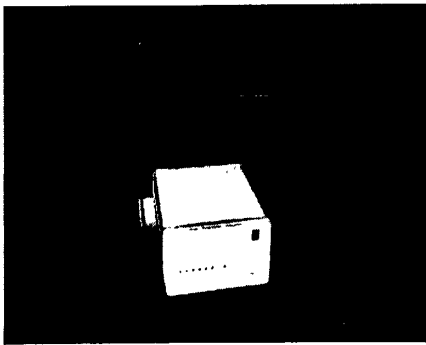


图4.8 同步器



图4.9 分析软件及激光控制器

4.3 实验及数据处理

4.3.1 铺沙及连接仪器

利用等效性，高压输电导线使用直径为 31 mm （与 1 号导线直径几乎相同）的玻璃棒代替，这样可以保证激光透过玻璃板，照射到玻璃棒下面的沙粒上，保证能拍摄到完整的流场。连接仪器，并将玻璃棒用铁支架固定于风洞实验段的后部，玻璃棒中心距风洞底面的距离为 12.5 cm （图 4.12）。实验具体设置示意图见图 4.11。

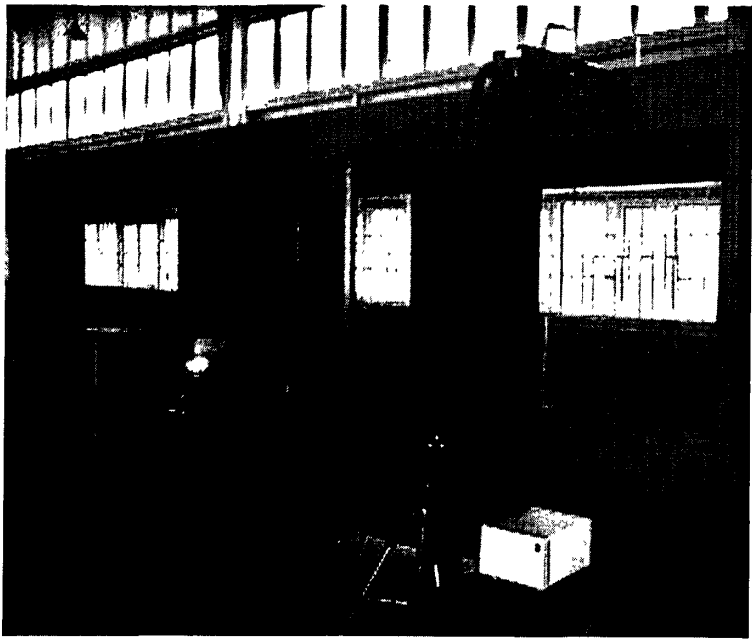


图4.10 PIV整体连接图

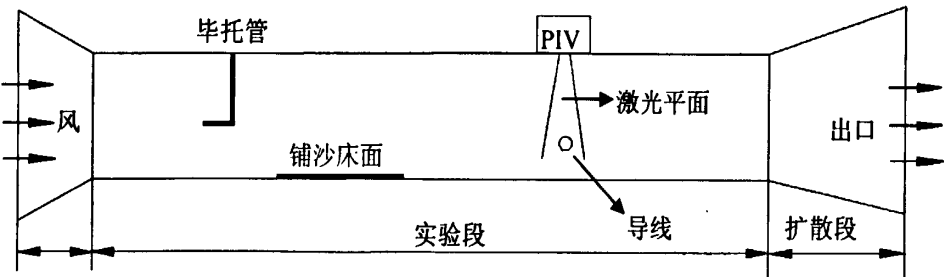


图4.11 风洞实验段中心垂直剖面上实验仪器布置示意图（侧视）

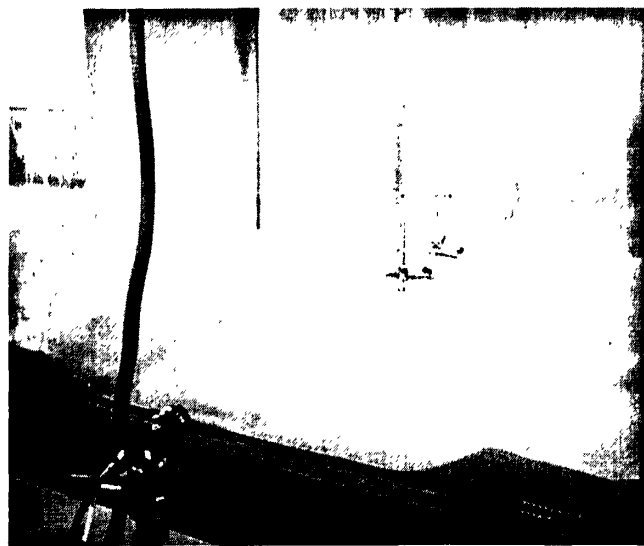


图4.12 玻璃棒固定

铺沙床面的厚度为 6 cm ，铺沙长度为 4 m 。

风速采用 10 m/s 、 15 m/s 、 20 m/s 和 25 m/s 4 种风速。采用的沙粒来自于民勤细沙，粒径为 $20\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 。为了保证数据精确可靠，每种方案吹风 $1\sim 2$ 分钟，重复实验一次 $2\sim 3$ 次。

4.3.2 标定

Nd:YAG 脉冲激光器的标定实际上是对两台激光器所形成的片光重合度的标定，以保证两个片光保持重合照射到同一个待测平面上。PIV 采用 256 级灰度的方式来识别示踪粒子信息，Nd:YAG 脉冲激光器中的两台激光器的型号、功率相同，所以两台激光器发出的片光亮度分布一致，不影响图像处理时对同一粒子的判别。调整激光的强度及频率到适当的数值，以便拍摄。

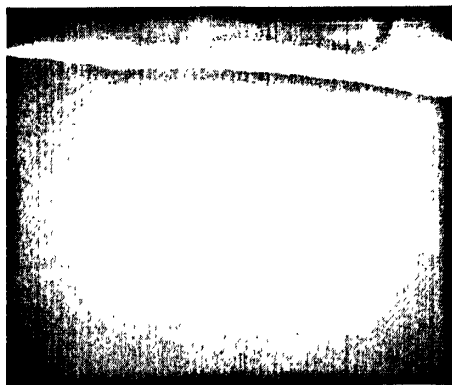


图4.13 激光调试



图4.14 标定

调节 CCD 相机焦距，使得 CCD 相机拍摄面与片光所在面重合，保证 CCD 相机拍摄的是待测流场区域。要调节 CCD 相机焦距必须有一参考物，本实验采用的是厘米方格标定靶盘，标定靶盘上每两个白点之间的距离为 1 cm（图 4.14）。现用 CCD 相机对其进行拍摄，调节 CCD 相机焦距直到照片上方格子刻度清晰为止，说明 CCD 相机拍摄面就在激光照亮的横截面上。拍下照片，根据照片与实际尺寸的比例，可以计算出照片的对应像素所对应的实际尺寸值，为了得到较准确的值，应取 5 组数据进行平均，每组数据取标定靶盘上的点的位置不应重复，选取的点数也应不完全相同。

根据测量，得到的标定数值见表 4.1：

表4.1 标定测量数值表

实际尺寸 / <i>cm</i>	像素值 / <i>pixel</i>	平均值 / <i>pixel • cm⁻¹</i>
10	413.04	41.41
10	416.10	
5	208.00	
6	247.03	
8	331.10	

4.3.3 PIV 工作步骤

- 1.拍摄照片；
- 2.分析处理*t*时刻照片 A 中的粒子；
- 3.分析处理*t*+ Δt 时刻照片 B 中的粒子；
- 4.对两张照片中的粒子进行互相关分析。

4.3.4 实验数据处理

针对 4 个风速，在风速稳定后，对每个风速拍摄 50 组照片，并进行互相关分析。PIV 拍摄的照片为 TIF 格式，8 位灰度图，本文使用 Matlab 图片处理命令来对图像进行阅读及显示^[55]。

Matlab 阅读及显示灰度图的命令为：

```
[f,map]=imread('a.tif');
```

```
% f 为照片 a.tif 在 matlab 中的变量，map 为 RGB 矩阵。%  
Figure;  
% 创建一个新的图像对象，以输出图形。%  
Imshow(f,map);  
% 显示图形。%  
每个风速的 A 图形即为  $t$  时刻的粒子图，B 图形即为  $t + \Delta t$  时刻的粒子图形。  
图形中的点即为沙粒，实验得出每个风速下的 PIV 图形分别为：
```

10 m/s 风速情况下：

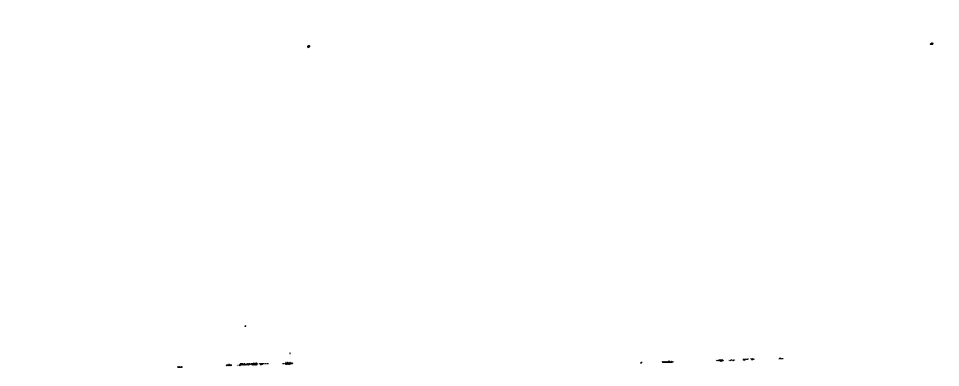


图4.15 10 m/s 风速粒子图A

图4.16 10 m/s 风速粒子图B

15 m/s 风速情况下：

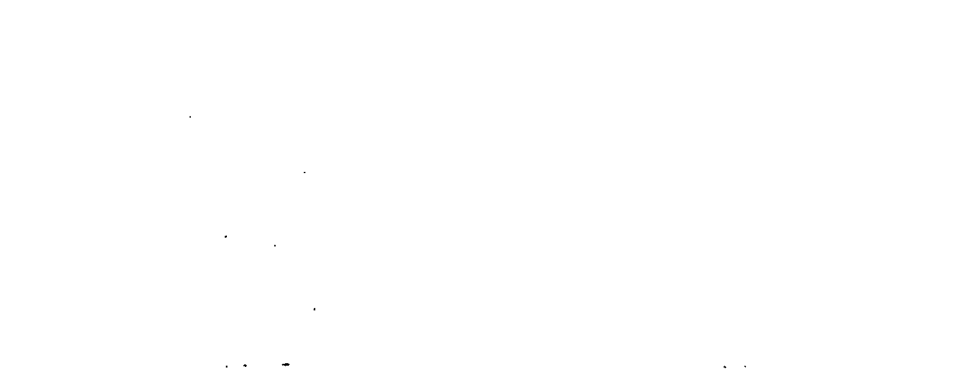


图4.17 15 m/s 风速粒子图A

图4.18 15 m/s 风速粒子图B

20 m/s 风速情况下：

图4.19 20 m/s 风速粒子图A

图4.20 20 m/s 风速粒子图B

25 m/s 风速情况下:

图4.21 25 m/s 风速粒子图A

图4.22 25 m/s 风速粒子图B

以上图形中, 图形下部粒子较多的地方是风洞底部表面上发生了滑移的沙粒。滑移的沙粒占移动沙粒的大部分, 所以在图形中所占的比较也比较大。

从以上图形中可以看出, 随着风速的增大, 被吹起的沙粒数量逐渐的增多, 沙粒被吹起的高度也逐渐的增大。

4.4 互相关分析及结论

对每个风速的 A、B 两个图形进行互相关分析, 经过 insight3G 软件的计算, 得到每个粒子的坐标及风速大小, 并存储与 excel 文档中, 本文使用 Matlab Link 处理此数据文件。

经过计算, 得到每个速度情况下粒子的速度矢量图 (图 4.23~4.26)。图中的圆圈为玻璃棒的示意图。

10 m/s 风速情况下:



图4.23 10 m/s 沙粒速度矢量图

15 m/s 风速情况下:



图4.24 15 m/s 沙粒速度矢量图

20 m/s 风速情况下:



图4.25 20 m/s 沙粒速度矢量图

25 m/s 风速情况下:



图4.26 25 m/s 沙粒速度矢量图

以上 4 张图片为 4 个风速下输电导线周围沙粒的速度矢量图。从矢量图中可以得出，随着风速的增大，沙粒的数量、沙粒被吹起的高度以及沙粒的瞬时速度

都逐渐的增大，大部分的沙粒都体现出了较好的跟随性。

各个风速情况下，导线前端均出现沙粒因与导线发生碰撞而与大部分的粒子不同，而是向与风速相反的方向移动，这与本文在风沙气固两相流中 DPM 模型中得到的模拟结果相吻合。

导线的后部均出现了沙粒空白区，即在这一段空白区内，并无沙粒的存在，这与本文在气固两相流模型中欧拉模型及 DPM 模型所计算得到的结果一致，如图 4.27~4.30 所示。

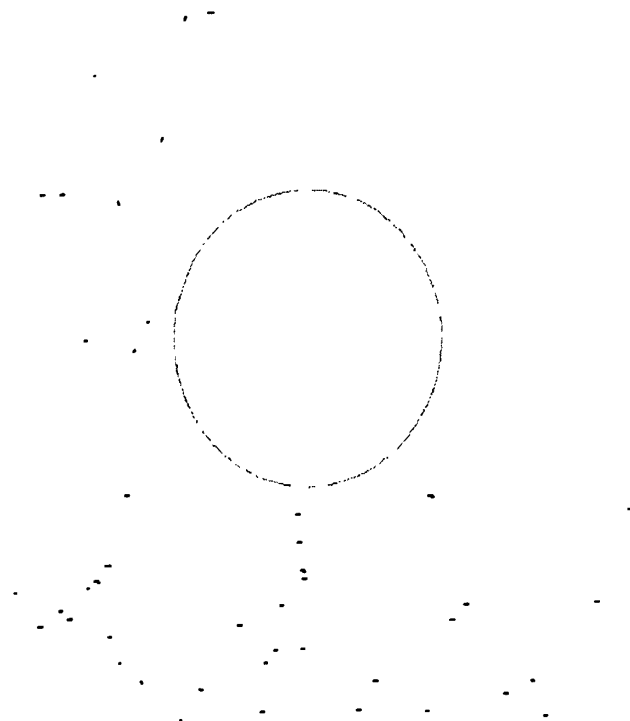


图4.27 10m/s 沙粒速度矢量图导线附近局部放大

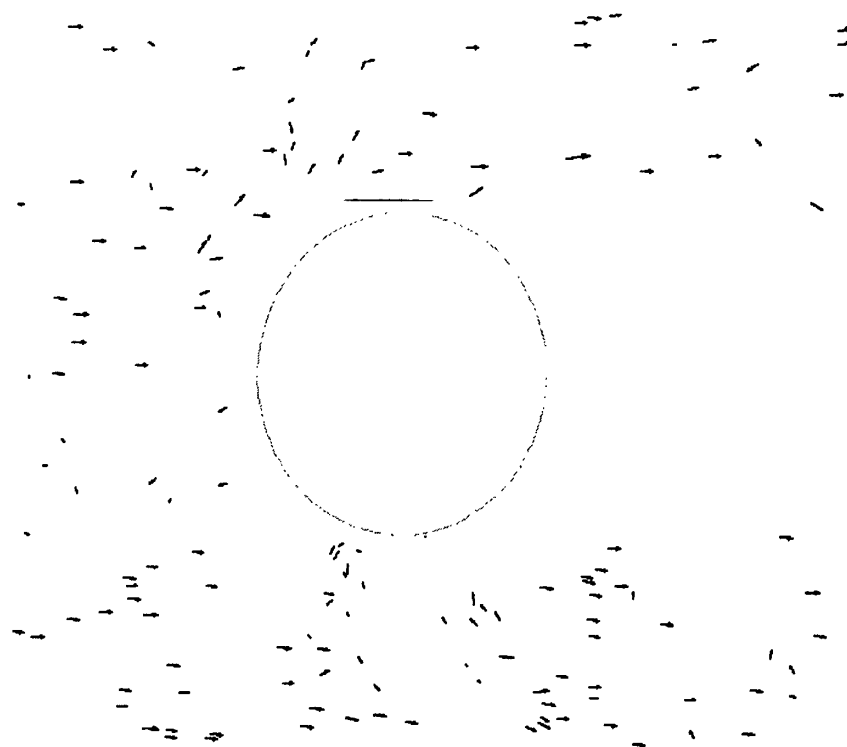


图4.28 15 m/s 沙粒速度矢量图导线附近局部放大

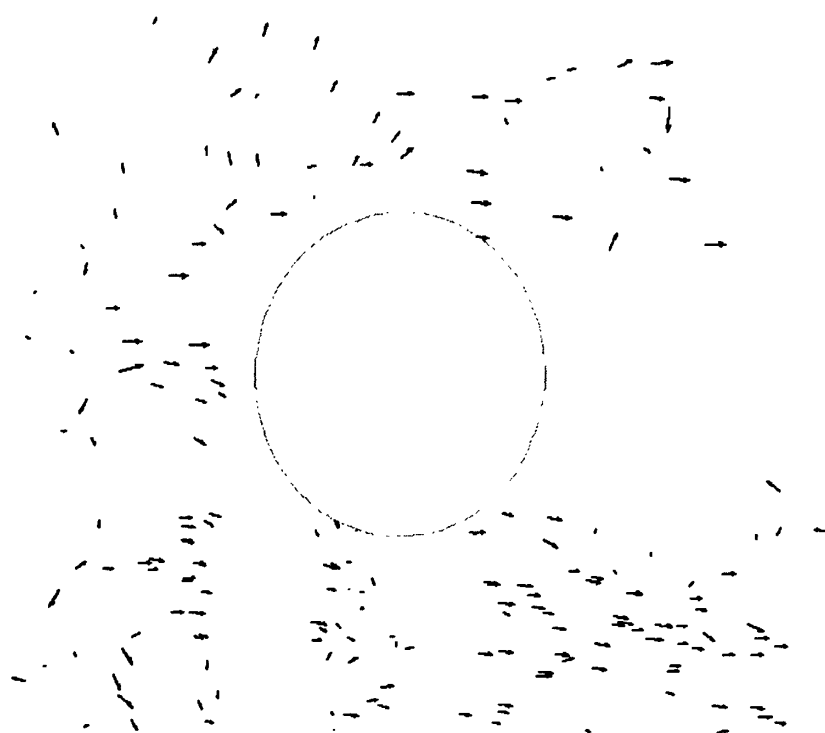


图4.29 20 m/s 沙粒速度矢量图导线附近局部放大

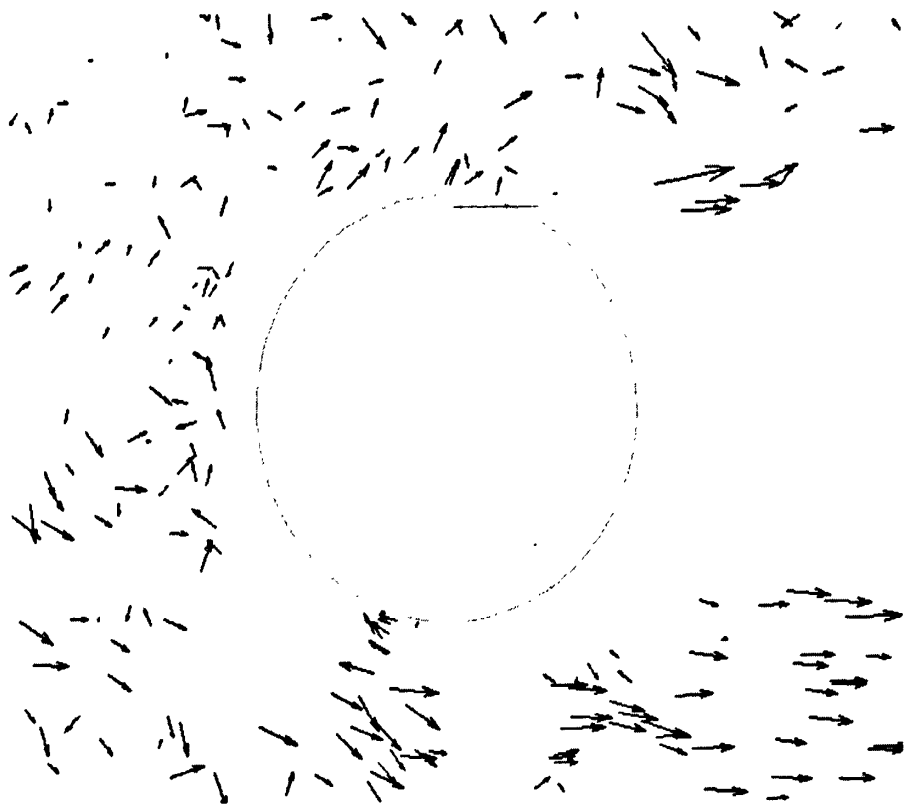


图4.30 25 m/s 沙粒速度矢量图导线附近局部放大

而在速度矢量图中，未能出现导线前端面贴近导线的区域沙粒堆积现象存在，这主要是因为沙粒距离导线太近，PIV 无法正确识别这些粒子导致。

由以上结论可知，本文在气固两相流欧拉模型中对输电导线周围的流场的模拟与实际情况中的沙粒流场是很相似的，定性地证明了本文对风沙气固两相流的数值模拟的正确性。这也为本文计算高压输电导线的放电现象的研究奠定了实验基础。

4.5 本章小结

在西部灾害与环境力学教育部重点实验室兰州大学多功能环境风洞实验室中进行了输电导线周围的沙粒分布，介绍了风洞的结构及附属仪器，简述了 PIV 的实验原理，并通过 PIV 得到了 10 m/s、15 m/s、20 m/s 和 25 m/s 情况下 20~200 μm 的沙粒位置分布及速度矢量图，将其与风沙气固两相流数值模拟的结果进行了比较，定性地验证了本文数值模拟结果的正确性。

第五章 结论与展望

5.1 总结

作为重要的生命线工程，输电线系统的破坏会导致供电系统的瘫痪，这不仅会造成重大的经济损失，同时可能会引发火灾等一系列次生灾害，给社会和人民的生命财产造成重大威胁。沙尘暴过境时，高压输电线路会出现高压打火、输电网络断电等现象，有时还击穿线路设备，危害人身安全，造成重大事故，严重影响到国家电力系统的可靠运行。国家“十二五”规划纲要中，提出了加速发展特高压输电技术，加快建设“现代电网体系”的发展目标，在现有的高压输电网的基础上，规划建设特高压电网，以求在更大范围内优化配置电力资源。为了减少电力系统由于沙尘暴导致的经济损失，也为我国高压输电系统安全运行提供必要的理论支持，对输电系统由于沙尘暴导致输电导线产生电晕甚至断电的研究显得格外重要。

针对上述情况，本文结合了国内外的研究现状，主要完成了以下工作：

一、根据流体动力学原理，建立了沙尘暴经过高压输电线路时的风沙气固两相流场模型，分别使用欧拉模型及 DPM 模型计算了不同风速、不同粒径情况下，沙粒在输电线周围的浓度分布情况，为计算沙粒围绕输电导线情况下的输电导线的电场强度奠定了基础。

沙尘暴环境下，在输电导线前端会出现沙粒堆积现象，随着风速的增大，堆积沙粒的体积分数有所减小，而随着粒径的增大，堆积沙粒的体积分数减小。同时，输电导线前端的沙粒会因为与输电导线的碰撞而出现反弹，之后跟随空气继续流动，输电导线后端会出现一段无沙粒区。

二、根据风沙气固两相流的数值模拟结果，使用有限元-镜像法建立了沙尘环境下的高压输电导线电场耦合模型，使用静电场分析的方法，分别分析了两种直径的高压输电导线在不同风速、不同粒径情况下导线周围的电场强度分布。结合计算结果，并根据输电导线起晕场强的经验公式，初步揭示了高压输电导线在沙尘暴环境下产生电晕放电的机理：沙尘暴通过高压输电导线时，由于沙粒的存在，输电导线周围的介质发生了改变，由于沙粒浓度分布不同，由空气和沙粒组成的

介质的相对介电常数也不相同,且沙粒携带一定量的电荷,使得输电导线的电场分布发生了畸变,且最大电场强度大于输电导线的起晕电场强度值,高压输电导线产生电晕放电现象。

三. 为了验证本文中对风沙气固两相流数值模拟结果的正确性,本文通过风洞实验,并使用粒子图像测速法(PIV)技术,对不同风速情况下 20~200 μm 沙粒围绕输电导线的分布情况进行了实验及分析。并使用 MATLAB 对实验结果进行了处理,得到了沙粒的速度矢量图。实验结果很好的定性证明了本文中对风沙气固两相流流场数值模拟的正确性。

本文的创新之处在于:首次对沙尘暴过境时,高压输电导线周围的电场分布进行了分析,初步揭示了输电导线在沙尘暴情况下的放电机理。

5.2 展望

沙尘条件下的高压输电系统是一个非常复杂的空间耦合结构,其电晕的产生由很多因素造成。沙尘暴近年来呈多发的趋势,而高压输电系统也在不断的发展,研究高压输电系统的电晕放电原理,对其安全运行具有重大的现实意义。

本文的不足之处在于:

(1) 高压输电导线多为分裂导线,本文在建立模型时将分裂导线简化为单根导线,并且未考虑地线对整个输电体系的影响。

(2) 风洞试验中,由于客观实验条件的限制,未能对输电导线带高压电的情况下风沙流场分布进行测量,今后在实验中应加以实验测量。

参 考 文 献

- [1] 舒印彪.我国特高压输电的发展与实施[J].中国电力,2005,38(11):1-8.
- [2] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dune[J],London: Methuen, 1941.
- [3] Zingg A W. A study of the movement of surface wind[J], AqrEng, 1949, 30:11-13.
- [4] Chepil W.S. An air elutriator for determining the dry aggregate soil in relation to edibility by wind[J].Soil Scz,1951,71:197-207.
- [5] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. J Fluid Mech, 1964, 20:225-242.
- [6] Ungar J, Haff PK. Steady state saltation in air[J]. Sedimentology, 1987, 34: 289-299.
- [7] Anderson R S, Haff P K. Wind modification and bed response during saltation of sand in air[J]. J Acta Mech,1991, Sippl: 21-25.
- [8] 王洪涛,董治宝,张晓航.风沙流中沙粒浓度分布的实验研究[J].地球科学进展, 2004, 19(5): 732-735.
- [9] 杨杰程,张宇等.三维风沙运动的 CFD-DEM 数值模拟[J].中国科学, 2010, 40(7): 904-915.
- [10] 郑晓静,王萍.风沙流中沙粒随机运动的数值模拟研究[J].中国沙漠, 2006, 26 (2):184-188.
- [11] Greely R, Leach R. A preliminary assessment of the effects of electrostatics on Aeolian process[J]. Rep Planet Geol Program, NASA TM 79729:236-237.
- [12] Greely R, Iverson JD. Wind as a Geological Proceeding on Earth, Mars, Venus and Titan London[C].Cambridge University Press, 1985.
- [13] Schmidt DS, Schmidt AS, Dent JD. Electrostatic force on saltation sand[J].J Geophysical Research,1998,103:8997-9001.
- [14] Latham J. The electrification of snow storms and sand storms[J]. Q J R Meteorel Soc, 1964, 90:91-95.
- [15] Zheng Xiaojing, Huang Ning, Zhou Youhe. Laboratory measurement of

- electrification of wind-blown sands and simulation of its effect on sand saltation movement[J]. J Geophys Res, 2003, 108, D10, 4322.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Gill E W B. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 162:568-569.
- [19] Farrell GD. The electric field of a large dust devil[J]. J Geophys Res, 1960, 65: 3504.
- [20] Crozier W D. The electric field of a New Mexico dust devil[J]. J Geophys Res, 1964, 69:5427-5429.
- [21] Kamra A K. Measurements of the electrical properties of dust storms[J]. J Geophys Res, 1972, 77:5856-5869.
- [22] Ali A A, Alhaider M A. Millimeter wave propagation and communication- a field in Riyadh[R]. SANCST Project No.AR25229, First and Second Progress Reports, 1984.
- [23] Rudy W. Echo intensities and attenuation due to clouds, rain, hail, sand and dust storms at centimeter wavelengths[R]. Report 7831, Research Laboratories of General Electric Company LTD, 1941.
- [24] Zhao Shuzong. The effects of sand dust storm on microwave's propagation [J]. 1985, 2:43-51.
- [25] Yin Wenyan, Xiao Jingming. The effects of sand and dust storms on microwave link[J]. Journal of China Institute of Communications, 1995, 5:93-95.
- [26] 屈建军,俎瑞平,言穆弘等.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, 24(5):534-538.
- [27] 凌裕泉,贺大良,李长治.风沙电现象实验研究[C].中科院兰州沙漠所治沙会议论文集, 1984.
- [28] 刘贤万.实验风沙物理与风沙工程学[M].科学出版社, 1995.
- [29] 贺博,张刚,陈邦发等.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]. 2010, 40(3): 296 ~ 302.
- [30] 郑天茹.特高压输电线路尖端电晕放电的研究[D].山东:山东大学,2010.
- [31] 韩少卫.高压直流输电线路电晕起始电压以及起始场强研究[D].华北电力大学,2008.
- [32] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [33] 张默.基于 FLUENT 的建筑物风沙两相流场数值模拟[D].哈尔滨工业大学, 2008.
- [34] 李进良,李承曦,胡仁喜.精通 FLUENT 6.3 流场分析[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [35] 倪晋仁,李振山.风沙两相流理论及应用[M].北京:科学出版社,2006.
- [36] GB/T 20480-2006,沙尘暴天气等级[S].
- [37] 黄本才,汪丛军.结构抗风分析原理及应用[M].上海:同济大学出版社,2008.
- [38] GB 50009-2001,建筑结构荷载规范[S].
- [39] GB 50545-200X, 110kV ~ 750kV 架空输电线路设计规范[S].
- [40] 韩占忠. Fluent 流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
- [41] 温正,石良臣,任毅如. FLUENT 流体计算应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [42] 粟福衍.高压输电的环境保护[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [43] 毛文奇,刘海燕,徐华.特高压输电对环境影响的讨论[J].电力建设, 2004,25(8): 54-56.
- [44] 梁曦东,陈昌渔,周远翔.高电压工程[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [45] 阎照文.ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [46] 陈仕姜. 500kV 超高压输电线工频电场分布及控制研究[D].福建:福州大学,2006.
- [47] 牛林,赵建国.特高压输电线路分裂导线表面电位梯度的分析计算[C].中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会.南京:河海大学,2006:264-268.

- [48] 杨文翰,吕英华.用模拟电荷法求解高压输电线附近电磁场[J].电网技术,2008,32(2):47-55.
- [49] 商跃进.有限元原理与 ANSYS 应用指南[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [50] 张红.高电压技术[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [51] 付启明,袁建生.绞线花纹导线表面电场强度计算与分析[J].高电压技术,2007,33(4):77-80.
- [52] 张洪信,管殿柱.有限元基础理论与 ANSYS11.0 应用[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [53] DL T5092-1999. 110 ~ 500kv 架空送电线路设计技术规程[S].
- [54] 刘刚. PIV 技术在喷油雾化等流场测量中的运用[D].天津:天津大学,2007.
- [55] 段俐,康绮,申功忻.PIV 技术的粒子图像处理方法[J].北京航空大学学报,2000,26(1):79~82.
- [56] 郭仕剑,邱志模,陆静芳等.MATLAB 入门与实践[M].北京:人民邮电出版社,2008.

攻读学位期间本人出版或公开发表的论著、论文

- [1] 史耀虎,高强,任超等.大跨越输电塔电梯井道在静风载荷下的受力分析.苏州大学学报(工科版),2009,29(4):30-32.
- [2] Qiang Gao, Yaohu Shi. Research on the Mechanism of Discharge of Transmission Line in Wind-Sand-Electric Field. Applied Mechanics and Materials, 2011, 43: 169-172

致 谢

本文是在导师高强老师精心指导和大力支持下完成的。三年来，高强老师的严谨求实的治学态度、高度的敬业精神、兢兢业业、孜孜以求的工作作风和大胆创新的进取精神，对我产生了很重要影响。他渊博的知识、开阔的视野和敏锐的思维给了我深深的启迪。同时，在生活上也给予了无微不至的关怀与帮助。

在此，谨向高强老师致以最诚挚的感谢和崇高的敬意。

另外，我还要特别感谢兰州大学黄宁教授、佟鼎和张洁学长对我实验以及论文写作的指导，他们为我完成这篇论文提供了巨大的帮助。

感谢实验室任超、朱斌、孙辉、张丽、王海林和崔江伟同学对我的无私帮助，使我得以顺利完成论文。

最后要感谢我的家人以及我的朋友们对我的理解、支持、鼓励和帮助，正是因为有了他们，我所做的一切才更有意义，也正是因为有了他们，我才有了追求进步的勇气和信心。

最后，再次对关心、帮助我的老师和同学表示衷心地感谢。

史耀虎

2011年4月于苏州大学

