

《电网绝缘子积污预警技术研发》项目总结报告

一、项目概况

项目名称：电网绝缘子积污预警技术研发

立项时间：2015 年

项目编号：BY2015070-15

项目负责人：杨林军

合作企业：江苏省电力公司电力科学研究院

经费情况：

经费单位：万元

项目来源	江苏省产学研前瞻性联合研究项目			
项目编号	BY2015070-15			
项目名称	电网绝缘子积污预警技术开发			
经费投入		经费支出		
来源	投入数	科目	支出数	其中：省拨款 支出 数
投入合计	99.9526	支出合计	92.5279	22.5753
1、省拨款	30	(一) 直接费用	87.9085	17.9559
2、部门、地方 配套	0	1、设备费	32.8913	2.0188
3、承担单位自 筹	69.9526	(1) 设备购置费	32.8913	2.0188
4、其他来源	0	(2) 设备试制费	0	0
		(3) 设备改造与租赁费	0	0
		2、材料费	18.0004	2.7157
		3、测试化验加工费	6.215	0.11
		4、燃料动力费	0	0
		5、差旅费	7.6351	3.6018
		6、会议费	0.9462	0.6392
		7、国际合作与交流费	0	0
		8、出版/文献/信息传播/ 知识产权事务费	5.6405	2.7704

		9、劳务费	16.58	6.1
		10、专家咨询费	0	0
		11、其他支出	0	0
		(二) 间接费用	4.6194	4.6194
		其中：绩效支出	1	1
经费结余		7.4247		

主要研究内容：

①江苏省重点污染源周边空气质量监测数据采集与实地测试及绝缘子自然积污试验研究

结合文献查阅和相关统计资料，开展重点污染源周边空气质量监测数据收集整理工作；并依据江苏省主要大气污染源企业分布及排放数据，进行选点挂绝缘子开展绝缘子自然积污试验。研发移动式污源特性数据监测装置，对重点污染源周边、挂绝缘子之处空气中颗粒物浓度及粒径分布、气象要素（如温度、湿度、风速、风向、大气压、降雨量等）、大气中NO₂ 及SO₂ 浓度开展实时监测，并将数据通过无线网络传输到监测后台。同时采用烟气分析仪、烟尘采样仪对重点污染源排放废气中气态污染物及烟尘浓度进行测试分析。

②绝缘子人工积污试验研究

搭建模拟风洞试验平台，开展不同气候条件与污染条件下的典型绝缘子积污特性，以及绝缘子污秽-受潮-湿清除过程研究；在此基础上，开展典型绝缘子积污循环试验，探究绝缘子长期积污特性。为绝缘子积污过程数值模拟提供边界条件和后续验证。将人工积污实验与自然积污实验对比分析，得出复杂气象条件下

绝缘子积污特性及规律。

③不同地形条件下气态污染物、颗粒物在大气中的扩散特性
通过对采集及实测的监测数据的处理与分析，获得不同地区不同位置与不同时间段内的空气质量与废气排放数据。采用WRF (Weather Research and Forecasting model)+CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) 模式系统，模拟不同气象条件下气态污染物、颗粒物在大气中的扩散现象，研究不同地形条件下气态污染物、颗粒物在大气中的扩散特性，使之能预测所关注区域的气态污染物和颗粒物浓度。

④绝缘子表面积污过程数值模拟研究

结合污染物在大气中扩散研究成果，研究大气中颗粒物在绝缘子表面的沉积与吸附特性。基于计算流体力学 (CFD) 技术，采用欧拉和拉格朗日相结合的建模方法，分别描述大气流动和大气中颗粒物在绝缘子表面沉积、附着过程。在试验证实数值模拟结果与试验结果相吻合条件下，充分利用计算机数值模拟这一有效工具，广泛研究与计算不同大气环境条件下绝缘子表面的积污规律，获得不同条件下积污厚度随时间的变化关系曲线。根据所建立的不同天气条件下绝缘子积污增长仿真分析评估模型，结合当地环境空气污染物 (NO₂、SO₂、TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 等) 浓度数据和气象信息，能够实现绝缘积污厚度预测、

预警和预报。

二、项目实施情况

1. 校企联合研发团队的组织

研发团队依托校企产学研合作机制，不断吸引领域顶尖人才加入，采用有效的激励机制保留和发展人才，加强研发团队的学习和培养，增强团队的核心竞争力。

项目承担单位东南大学投入 6 人，其中教授 3 人，博士生 2 人，硕士生 1 人；项目合作单位江苏省电力公司电力科学研究院投入 5 人，其中高级工程师 3 人，中级工程师 2 人；项目参加单位南京信息工程大学投入 3 人，其中副教授 1 人，硕士生 2 人，通过沟通与协调，建立了互信共赢的合作机制，集中力量解决重大难题。

2. 实施计划的制订与落实

研究工作的具体计划和完成情况如下表所示：

时间	研究进度	完成情况
2015 年 5 月至 12 月	采集近期江苏省重点污染源空气质量监测数据；提出移动式污染源特性数据远程监测装置构建方案；提出人工模拟环境条件下绝缘子积污试验台搭建方案。	已完成
2016 年 1 月至 12 月	补充测量污染物排放量，构建移动式污染源特性数据远程监测装置；搭建人工模拟环境条件下绝缘子积污试验台；建立典型大气环境条件下污染物扩散迁移模型；建立典型工况条件下绝缘子表面颗粒物沉积模型。	已完成
2017 年 1 月至 12 月	收集近期江苏省重点污染源周边空气质量监测数据，并开展实地测试；建立不同地形条件下，大气环境中污染物扩散迁	已完成

	移模型;开展绝缘子表面污染物沉积规律实验研究;不同条件下绝缘子表面颗粒物沉积计算与验证。	
2018年01月至2018年07月	收集近期江苏省重点污染源空气质量监测数据,并开展实地测试;完成数据后处理及污染物沉积模拟系统界面设计;撰写报告,项目结题。	已完成

3. 企业研发人员的培养培训

在项目实施阶段,企业研发团队负责项目相关业务的支持,并积极参与相关技术的研究,通过深入地学习与研究,已具备独立研究的扎实素质,通过本项目的进行为企业培养了多名优秀的技术骨干,形成一支优秀的企业研究团队。

4. 项目完成情况评价

(1) 在江苏省徐州市选取两处污染较严重地点作为实验点,在两实验点当地输电线路悬挂若干绝缘子进行现场积污实验,实验时间选取为2014年10月1日到2015年6月1日,每两个月为一个实验阶段,每个实验阶段结束后,取回一定数目的绝缘子进行灰密、盐密测量,采用清洗、溶解、过滤、称重的方法测量灰密,采用清洗、溶解、测溶液电导率的方法测量盐密。

基于本项目研究的物理过程和对象的特点,选取所运用的数学模型方案,结合XWP2-160型绝缘子尺寸,对绝缘子串采用三维建模,用欧拉法处理气相场,拉格朗日法处理离散颗粒场,采用南京信息工程大学根据江苏省主要大气污染源企业分布及排放数据,利用大气污染物扩散数值模型计

算输出的实验点当地气象和污染物信息作为计算条件，对大气环境中的污染物颗粒在绝缘子周边的运动和在绝缘子表面的沉积进行数值模拟，计算得出实验点当地每个实验阶段的积污量与积污区域。

(2) 结合实验点当地降雨量数据，利用通过实验得出的绝缘子表面盐密、灰密清洗率与降雨量的相关关系对盐密、灰密计算值进行修正，将修正后的计算值与实验值进行对比，验证所建数学模型的有效性。对模拟得出的绝缘子表面积污形态云图和取样绝缘子积污照片进行对比分析，进一步验证数学模型的有效性。

(4) 通过设计搭建人工雾霾试验平台，采用人工模拟绝缘子在雾霾环境下积污的方法，开展了细颗粒以不同风速条件在绝缘子表面积污的试验。利用试验获得的粒径和风速对颗粒积污的影响规律对所建积污模型进行改进和完善，使得模拟值与实验值更加接近，预测结果更加准确。

(5) 在所建模型具有较好的有效性和准确性的基础上，对大气污染物扩散数值模型输出的大量气象和污染物信息进行整理和统计，对不同大气污染环境条件下，绝缘子表面的积污过程进行大量地数值模拟计算，将计算结果分类、整理并以此建立数据库，并在此基础上，将研究涉及的技术路线、求解方法、计算结果进行整合，开发 " 绝缘子表面积污数值计算系统 "，以预报不同环境条件下绝缘子表面的积污情况。

5. 预算执行情况

到目前为止，项目经费计划中省拨款、单位自筹资金已按计划到位，项目组所有单位对科技拨款严格按照科技经费开支的有关规定，专款专用，有力的支持了项目的实验，保障了项目的顺利完成。

项目经费预算投入 100 万，其中省拨款 30 万，承担单位自筹 70 万。截止 2018 年 6 月总共投入项目经费 99.526 万（其中省拨款 30 万元），项目实际进行过程中合计支出经费 92.5279 万元（省拨款占 22.57537 万元），结余经费 7.424704 万元（省拨款占 7.424704 万元）。支出经费中直接费用 87.9085 万元（省拨款占 17.9559 万元）：设备费 32.8913 万元（省拨款占 2.0188 万元），材料费 18.0004 万元（省拨款占 2.715682 万元），测试化验加工费 6.215 万元（省拨款占 0.11 万元），差旅费 7.6351 万元（省拨款占 3.60183 万元），会议费 0.9462 万元（省拨款占 0.6392 万元），出版/文献/信息传播/知识/知识产权事务费 5.6405 万元（省拨款占 2.770367 万元），劳务费 16.58 万元（省拨款占 6.1 万元），；支出经费中间接费用 4.61947 万元（省拨款占 4.61947 万元）。

三、项目技术情况

1. 项目的研究方法及技术路线

项目的研究方法及技术路线：

(1) 采用计算流体力学方法，对双伞 XWP2-160 型绝缘子采用三维建模，采用欧拉方法对气相场建立模型，采用拉格朗日方法对离散颗粒场建立模型。介绍了边界条件和网格划分方式的选取，进行了网格无关性的验证，采用大气污染物扩散数值模型输出的气象和污染物信息作为计算条件，气固两相间错合计算采用单向耦合的方式，结合汇编程序对颗粒在绝缘子周边的运动和沉积进行了追踪计算。结合实验点降雨数据与盐密、灰密清洗率与降雨量的相关关系，对数值模拟值进行降雨修正。

(2) 选取两处污染严重地区作为实验点，在当地输电线路悬挂绝缘子

进行自然积污实验，每两个月为一个实验阶段，共分为四个实验阶段。在实验开始，在每个实验点悬挂若干个绝缘子，每个实验阶段结束，取下三片绝缘子进行表面等值盐密与灰密的测量，将每次所取的三个绝缘子的灰密和盐密测量结果取平均值。

(3) 采用人工积污试验的方法，对风速和粒径对颗粒在绝缘子表面沉积的影响规律进行研究，将得到的规律补充到所建计算模型中，对系统进行改进，使得计算更加精确，模拟值与实验值更加接近。改进后的系统模拟结果与实验值的增减规律更加吻合，二者之间的相对误差减小至 15% 以下，绝缘子积污预测系统的准确性得到大幅度提高。

项目解决的关键技术：

(1) 为了使绝缘子积污过程模拟更加真实有效，南京信息工程大学大气物理学院利用大气污染物扩散数值模型输出实验点当地的气象和污染物浓度信息作为模拟计算条件。气象信息包括实验点当地的水平风速、垂直风速、风向、当地温度，其中对绝缘子周边流场起作用的主要为水平风速；污染物信息包括小于 $0.1\mu\text{m}$ 、 $0.1-2.5\mu\text{m}$ 、 $2.5-10\mu\text{m}$ 三个粒径范围的污染物颗粒数浓度与质量浓度以及大气中以固态气溶胶形式存在的可溶性盐分和不可溶性灰分的主要成分及其含量。

(2) 连续相和离散相的求解分开进行，使用 Fluent 软件求解定常流动连续相气相场，然后将气相场流场计算数据导入离散相求解程序中求解，离散相求解程序采用 VB 语言编写，解决了颗粒运动数据的存储和处理，颗粒沉积区域统计等后处理等问题。

取得的突破性进展及创新点：

(1) 将计算流体力学的方法应用到绝缘子积污规律的研究中。采用欧拉和拉格朗日相结合的建模方法，分别描述大气流动和大气中细颗粒物在绝缘子表面沉积、附着过程。

(2) 气相场计算中，采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型力求提高计算绝缘子外部流场湍流漩涡的精度，同时采用非稳态计算以达到更准确地描述绝缘子外部流场的目的。

(3) 大气中细颗粒物在绝缘子表面沉积、附着模型的建立过程中，结合自然积污实验及人工积污试验的结果，综合考虑气象条件（空气湿度、温度、季节风向与风速、降雨量）、细颗粒物成分（绝缘子所在地域粉尘种类、浓度、粘度）、绝缘子表面形状（不同种类绝缘子几何形状、凹凸面、迎风面、正反面）等因素的影响，使模型尽可能接近实际。

(4) 通过人工积污试验对风速和粒径对颗粒沉积的影响进行研究，得到了不同粒径颗粒在不同风速条件下的积污规律，在定义颗粒浓度降低比率的基础上，计算出各个粒径颗粒在不同风速下的浓度降低比率，通过拟合分析得到了高风速与低风速下颗粒的浓度降低比率与粒径的关系式。

四、合同任务指标完成情况

1. 实际完成的研究内容

①江苏省重点污染源周边空气质量监测数据采集与实地测试及绝缘子自然积污试验研究

结合文献查阅和相关统计资料，开展重点污染源周边空气质量监测数据收集整理工作；并依据江苏省主要大气污染源企业分布及排放数据，进行选点挂绝缘子开展绝缘子自然积污试验。研发移动式污源特性数据监测

装置，对重点污染源周边、挂绝缘子之处空气中颗粒物浓度及粒径分布、气象要素（如温度、湿度、风速、风向、大气压、降雨量等）、大气中 NO₂ 及 SO₂ 浓度开展实时监测，并将数据通过无线网络传输到监测后台。同时采用烟气分析仪、烟尘采样仪对重点污染源排放废气中气态污染物及烟尘浓度进行测试分析。

②绝缘子人工积污试验研究

搭建模拟风洞试验平台，开展不同气候条件与污染条件下的典型绝缘子积污特性，以及绝缘子污秽-受潮-湿清除过程研究；在此基础上，开展典型绝缘子积污循环试验，探究绝缘子长期积污特性。为绝缘子积污过程数值模拟提供边界条件和后续验证。将人工积污实验与自然积污实验对比分析，得出复杂气象条件下绝缘子积污特性及规律。

③不同地形条件下气态污染物、颗粒物在大气中的扩散特性

通过对采集及实测的监测数据的处理与分析，获得不同地区不同位置与不同时间段内的空气质量与废气排放数据。采用 WRF (Weather Research and Forecasting model) +CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) 模式系统，模拟不同气象条件下气态污染物、颗粒物在大气中的扩散现象，研究不同地形条件下气态污染物、颗粒物在大气中的扩散特性，使之能预测所关注区域的气态污染物和颗粒物浓度。

④绝缘子表面积污过程数值模拟研究

结合污染物在大气中扩散研究成果，研究大气中颗粒物在绝缘子表面的沉积与吸附特性。基于计算流体力学 (CFD) 技术，采用欧拉和拉格朗日相结合的建模方法，分别描述大气流动和大气中颗粒物在绝缘子表面沉积、

附着过程。在试验证实数值模拟结果与试验结果相吻合条件下，充分利用计算机数值模拟这一有效工具，广泛研究与计算不同大气环境条件下绝缘子表面的积污规律，获得不同条件下积污厚度随时间的变化关系曲线。根据所建立的不同天气条件下绝缘子积污增长仿真分析评估模型，结合当地环境空气污染物（NO₂、SO₂、TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 等）浓度数据和气象信息，能够实现绝缘积污厚度预测、预警和预报。

本项目已获得大气环境条件下绝缘子表面积污过程计算机数值模拟系统，通过向该系统输入当地环境空气污染物（二氧化硫、氮氧化物、TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 等）浓度数据和气象信息（如风速、风向、湿度、降雨量等），能够实现绝缘子积污厚度预测、预警和预报，使之成为研究、分析绝缘子表面积污过程的有力手段。

本项目已研发移动式污源特性数据监测装置，对现场空气中颗粒物的浓度及粒径分布、典型气态污染物浓度、周围环境的气象要素开展实时监测，将数据通过无线网络传输到监测后台，实时准确掌握所测绝缘子的积污状况，为更可靠的状态评估提供技术支撑。

本项目能够实现污秽度在线评估，提出有效的污秽预警方法，提高输电线路外绝缘状态检修水平；建立电网污秽监测及预警系统；结合监测数据，掌握绝缘子积污规律，辅助实现电网电子污区图动态更新，实现全天候电网污闪预警和污秽状态评估的功能。

2. 工作指标

- 1) 构建大气环境条件下绝缘子表面积污过程计算数值模拟系统；
- 2) 研发移动式污源特性数据监测装置 1 套；

3) 培养相关专业技术研究、设计和运行人才 5 名；

4) 申请发明专利 5 项，其中已授权 3 项；申请实用新型 3 项，其中已授权 2 项；

5) 发表论文 10 篇，其中 SCI3 篇，EI2 篇；

6) 培养博士研究生 2 名，硕士研究生 3 名。

五、项目绩效分析

通过本项目的研究，对雾霾天气下的颗粒在绝缘子上的沉积特性有了更深入的了解，对促进本学科领域研究的发展具有重要的学术意义和工程应用价值。

本项目开发的 " 绝缘子表面积污数值计算系统 " 软件已经处于实际应用中，使用该软件后实现了对不同气象条件下绝缘子积污情况的预测、预警和预报，且预报精度在 85% 以上，大大减少了污闪发生的概率，从而降低了因处理污闪事故而带来的各种人力物力财力损失。该系统已成为研究、分析和预报绝缘子表面积污过程的有效工具，为保障电力系统安全稳定运行提供了可靠保障，这有着重要的科技意义和社会效益。

六、存在问题、有关建议及下一步研究设想

(1) 由于开展自然积污实验的困难性，本项目只针对江苏省输电线路使用量较大的 XWP2-160 型绝缘子，在江苏省徐州市选取两处实验点进行了实验和同步数值模拟，对其他材质和结构、其他不同地域和大气污染条件下绝缘子的积污规律没有进行进一步研究，今后还需针对在各种环境条件下、各种类型绝缘子的积污规律开展进一步实验和模拟研究。

(2) 由于条件的限制和处于安全问题的考虑，本项目未考虑绝缘子在

带电情况下的积污特性，而实际输电线路上的绝缘子是带电运行的，带电情况下绝缘子的积污比不带电情况更加严重，因为污秽颗粒还会受到电场力的影响。今后建议对带电情况下的绝缘子的积污规律进行更深入的研究，将会更加接近实际。