

# 输电线路覆冰机理及防冰技术研究

李学斌 郭子强

国网保定供电公司 河北保定 071000

**摘要:** 输电线路覆冰是严重的电网安全危害性自然因素之一,严重覆冰会造成导线舞动、绝缘子冰闪、杆塔倒塌甚至造成电网大范围停电事件发生,本文通过全面研究输电线路覆冰成因机制、监测预警技术及防冰除冰核心技术以及综合防治措施,通过对覆冰成因机制的研究,从冰核碰撞凝结过程、导线表面热量分布规律及离子流电场对覆冰增长的影响进行了阐述;针对其监测预警技术,比较分析了传统的监测手段及分布式的光纤测温系统,并提出了一种基于多指标参数融合下的覆冰检测算法;并对其综合防治措施进行了介绍。在防冰除冰技术上主要介绍了超疏水防冰涂料、热力融冰技术以及机械除冰的方式并针对复合式除冰新技术的应用进行了研究,在此基础上提出了覆冰监测-预警-处置一体化系统以及覆冰风险评估分级管理的方法以供输电线路覆冰治理参考。

**关键词:** 输电线路;覆冰机理;防冰技术

## 引言

输电线路覆冰是影响电力系统安全生产的一大重大自然灾害,截止到2025年,我国35千伏以上输电线路总长约240万千米,随着输电线路分布地区的不断增加,雨雪天气对于电网带来的危害也越来越大,过冷雨滴与输电线接触附着而结晶的覆冰会使输电线发生折断甚至断线的情况,进而导致电杆倒塌等一系列严重的事故,输电线路覆冰在国外也是比较常见的现象,在1998年加拿大魁北克雨凇灾害使得21人失去生命和大面积停电,在2005年德国的雨凇灾害也造成了巨大的损失。在我国也是如此,在2008年的南方暴雪冰灾中,电网大面积停电造成的直接损失高达1000亿元,在2012年北京市遭受大暴雨雪天气影响输电线路跳闸停电事件。2021年甘肃定西覆冰灾害导致了7430户停电;2025年初,湖南、湖北、贵州、云南等多省遭遇大范围持续雨雪冰冻天气,多条特高压输电线路出现严重覆冰,国家电网累计启动融冰作业数百次,全力保障电网安全运行。所以研究覆冰的发生机理,达到覆冰增长预报和融冰所需时间估算的目的,建立合理的控制方法,对于维护电网的安全有着重要的意义,本文将覆冰机理分析,监测预警技术、防冰除冰关键技术以及综合预防方案四个方面进行研究。

## 一、输电线路覆冰形成机理与生长模型

在输电线周围,水滴在外力的作用下发生运动轨迹的变化,从而改变覆冰的生长状态,在输电线上,除了受到气流的作用之外,由于水滴本身的极化带电,还受

到电力的作用。覆冰天气中,导线容易形成离子流形成的电场,较原来的电场更为复杂,需要分析离子流电场对覆冰的增长的影响因素,构建新的覆冰增长模型。为了解释离子流电场作用下输电线路积冰增长规律,在对改进的模拟电荷法以及二阶迎风有限体积法的基础上,反复求解离子流电场强度及空间电荷密度,在求解过程中同时考虑了风速的作用使得这种方法更加切合实际的输电线路环境,可以加快对离子流电场求解速度并提高其精确度。设计一个用电晕笼为手段来检验对离子流电场的计算结果。

在所提出的离子流电场的研究方法下,研究了水滴所带的电荷状态及其所处的不同电场区域,进而得到了有水滴存在的离子流电场。为了研究输电线路覆冰的增长机理及其影响的因素,则可以通过应用计算流体力学的方法,创建出一个覆冰增长全过程预测模型。利用欧拉-拉格朗日模型,在不同的风速下分析空气流动场的情况以及过冷水滴的运动轨迹及它同导线的碰撞情况,并通过仿真模拟观察覆冰外形在时间上的变化。随着覆冰时间的发展,覆冰外形慢慢变得椭圆并且会产生尖端效应进而影响着水滴的碰撞几率特性以及覆冰的形状等。为了探究离子流电场作用下覆冰增长原因,在欧拉-拉格朗日方法的基础上对水滴在气体流场和离子流场中的运动轨迹进行数值模拟,通过对结果进行研究得出离子流电场影响覆冰增长的机理为荷电水滴在离子流电场中会提高水滴与导线接触几率进而使得覆冰增长速率增加。

## 二、覆冰监测诊断与预警技术

### (一) 覆冰在线监测技术

传统高压输电线路绝缘子覆冰检测方式主要有称重法、拍照法、仿线检测法以及导线倾斜角度法等，这些方法各具特点可以对输电线路的覆冰情况进行比较准确地测量，从而保证电力系统的正常运转，但是这些方法都有一些不足之处，如监测的距离较短，容易受到周围环境的影响导致其准确性不高，且传输信息不稳定以及无法实现实时监控等等问题。而分布式光纤测温技术和光纤振动传感技术都是基于对光纤内传输光学信号的基本参数如频率、偏振度、幅度、相位等变化来感知光纤内部的多种物理量的变化，例如温度和振动及应变等。

分布式光纤传感技术有着测距远、实时连续分布式检测、抗电磁波能力强等优点，在输电线路强烈的电磁场干扰以及复杂恶劣的自然环境中都可以很好的工作，利用输电线路上的光缆内的光纤来进行传感的分布式光纤传感可以做到对输电线路的状态的实时在线连续检测，保证了检测结果的准确性及检测系统的可靠性。

本文在此基础上借鉴已有的分布式光纤传感技术的研究，提出了高度综合一体化多参数的分布式光纤传感技术，希望能够对输电线路各个状态参数如应力，温度，振幅以及损耗等等进行综合性的检测来达到实时监测、可靠判断、快速报警的效果，从而保证输电线路的安全稳定工作。表1对比了各类覆冰在线监测技术的原理与特点。

表1 各类覆冰在线监测技术对比

监测技术类型	基本原理	优势	局限性	适用场景
称重法	测量绝缘子串拉力变化 反算覆冰重量	原理简单、直接可靠	受温度、风速影响，需校准	常规线路监测
图像法	视频/图像识别覆冰厚度	直观可视、便于判断	受雨雾天气影响，夜间效果差	重要跨越区段
模拟导线法	同环境短导线称重监测	反映环境覆冰情况	与真实导线存在差异	气象观测站
导线倾角法	测量导线倾角变化计算弧垂	安装简便、成本较低	计算模型复杂	大档距线路
分布式光纤传感	布里渊/拉曼散射测量应变温度	连续分布、抗电磁干扰	监测成本高、数据处理复杂	重要骨干网架

### (二) 气象条件监测与微气象建模

覆冰的发生和发展受大气环境的影响较大，气温、湿度、风力大小是导致覆冰增大的三个主要气象因素。而微地形微气象区（风口、垭口及分水岭等地形复杂的地方）会出现局部重覆冰情况，要专门安装监测仪器。国网沧州市公司深入融合电网网架结构以及历次覆冰监控信息，合理确定重点危险地段，2025年11月在220千伏韩临Ⅰ线上进行抗冰防舞实战应急演练，在此期间建立“人类+机器”的立体式检测平台，部署“八哨三组”前方观测站随时观察线路覆冰状况，构建起“人机结合、空中与地面并行”的防冰新机制。国网保定供电公司针对西部山地涑源、涑水等地形复杂地段布置了七个固定观测站及十五个流动观测站定点对线路覆冰情况进行全天候观测，保证每个检测装置都在位，以精准的数据支持抗冰指挥决策。

究，在即时卫星遥感影像、雷达回波以及沿线微气象站观测数据的基础上，从湿度、气温、风速等气象变量出发，探讨其对导线覆冰的影响规律，构建分区段、分时间段、分级别的覆冰风险预警方案。在对全省融除冰设施及应急物资储备情况的整体调查基础上，制定完整的监测-预报-响应-处置预案，确立应急状态下的设备、物资互为支援的协作模式，提高应急反应水平。加强应急期间监控力度，在重要线路运行状况、局部微地形地貌变化、覆冰发展态势上实行全天候监控。党员技术人员成立交叉巡查小组，到500千伏邢电线等多个重点地段实施抗冰特殊巡视，努力做到“监测-预警-处理”的闭合循环，增强防范意识。

### (三) 基于数据驱动的覆冰预警

国网邢台供电公司同邢台气象局合作打造“气象+电力”防灾减灾平台，在气象局和供电公司之间设立数据传递通道以及应急合作机制，气象预警直通供电公司调度指挥中心，供电电力隐患信息迅速告知气象部门，气象局与供电公司共同对输电线路覆冰灾害风险开展研

## 三、输电线路防冰与除冰关键技术

### (一) 防冰材料与表面技术

电力设施覆冰灾害一直是危害电力系统安全供电的大规模自然灾害之一，在寒冷潮湿天气条件下输电导线以及绝缘子等会形成覆冰现象从而导致输电线路出现舞动、闪络以及倒塌断线等情况的发生而引起很大的损失和不良影响，传统的融冰除冰措施比如人工除冰、直流融冰等都会耗费大量能源并且除冰效果差或者会对设备产生一定的损害。所以研制出高效持久环保型的主动预

防性覆冰防护措施成为行业的当务之急，防冰涂覆层技术就是模仿了自然界中荷叶等物体的超疏水性能并加以材料表面性质调节、纳米结构的设计从而大大减缓了冰晶对于材料的凝固速度达到很好的抑制覆冰的效果。

超高疏水涂层的特点如下：其涂层表面拥有很低的表面自由能以及很低的水滴接触角，导致水滴无法浸润覆盖住。即便是遇到湿度大温度低的情况下形成的冰雪粘接在涂层基材上也会很容易脱离下来。对于已经存在的超高疏水涂层的机械性能差、易老化的问题，在其配方中加入了杂化交联网等方式，增加了涂层自身的耐磨性和抗化学腐蚀能力等性能指标，使涂层可以在恶劣环境中长时间保持良好的状态<sup>[1]</sup>。

## （二）热力融冰技术

在电流焦耳热融冰基础上，依据环境以及线路参数得出融冰时间以及融冰电流，在此基础上对覆冰导线的热传导问题进行了研究，以覆冰导线温度场数值解为基础，运用融冰过程中覆冰形状的变化求得融冰时间，同时结合所建立的含有离子流场的覆冰增长模型，考虑到融冰过程中覆冰还会继续增大这一现象，在此基础上提出了融冰时间的求法并分别对无覆冰增长与覆冰增长条件下融冰时间计算值加以比较，在此基础上根据设计、运行条件得出了最小及最大融冰电流，最后经过试验验证了融冰时间计算方法<sup>[2]</sup>。探讨了并联电容无功补偿融冰、分裂导线融冰、交流直流短路融冰等焦耳热融冰措施，作为防覆冰措施选择参考。

## （三）结构防冰与被动措施

结构防冰主要分为线路路径选取（避冰设计）、抗冰加固设计（提高设防等级）以及导线布置调整（排列方法、相间间隔棒）。被动防冰措施有阻雪环、防冰间隔棒等设备，在机械上防止覆冰产生或者使覆冰自行滑落。

## 四、输电线路覆冰综合防控体系与运行优化

### （一）覆冰监测—预警—处置一体化体系构建

根据本文建立的考虑了离子流场效应的输电线覆冰增长模型及融冰时间、融冰电流的计算方法提出了输电线防覆冰措施，旨在寻求覆冰增长速率最低与覆冰防治功耗最少的最佳覆冰防治方案，针对覆冰线路的防冰与融冰的选择，给出了输电线路覆冰防治思路，为输电线路覆冰防治提供借鉴。在66kV线路上进行了现场融冰试验，检验了融冰时间计算及覆冰防治策略的可行性。针对输电导线热力融冰安全风险小但耗时较长，机械冲击

除冰简易便捷却易损伤输电线路的特点，可以选择结合了开始热力融冰及机械冲击除冰复合式除冰法<sup>[3]</sup>。此方法先启动初热力融冰使得导线与导线上覆冰接触位置的冰融化，覆冰与导线之间的粘着力近似为零；再启动机械振动除冰只需很小的机械振动就能让覆冰脱离掉下来。使用组合式除冰方式其除冰时长是单纯使用热力融冰的10.00%~20.00%之间，最临界冲撞强度为单独使用机械振动除冰强度的40.00%左右。此种组合式除冰方式既能快速除冰又能保证对输电线路上的损害程度低，在除冰之后导线上不会有残留的薄冰，可以作为输电线路除冰的一种借鉴。

### （二）覆冰风险评估与分级管控方法

对覆冰风险进行分析要结合输电线路的实时覆冰情况、天气变化趋势及线路自身的抗覆冰性能等几个方面，形成覆盖冰风险分析模型并将其分类成不同的等级，根据风险等级的不同采取不同的管控手段。

## 结语

本文全面研究了输电线路覆冰机理以及防冰技术。从覆冰成因入手，发现了离子流电场使水滴碰撞几率增加从而促进覆冰生长的过程并利用欧拉—拉格朗日法建立了覆冰生长模型；针对对监测预警，分析了分布式光纤传感技术应用于输电线路覆冰在线监测的优势，并提出多参量集成监测策略；针对防冰除冰，对超疏水防冰层的工作原理加以探究，论证了复合型除冰技术（热力预融+机械冲击）的快速、安全除冰效果。综合防护上，设计了输电线路覆冰监测—预警—处理一体化模式，形成了覆冰风险分层管理机制。进一步提高防冰涂层的持久性、研发更加节能高效的融冰新技术、加强对人工智能应用于覆冰预测的研究力度以及建立相应的标准规范等都是以后的研究方向，从而更好的保障电力传输的安全稳定。

## 参考文献

- [1] 赵威, 彭巍屹, 周非凡, 等. 输电线路覆冰机理、预测及融冰技术研究综述 [J]. 浙江电力, 2026, 45 (02): 126-136.
- [2] 任翔. 高海拔地区输电线路覆冰机理及智能融冰技术研究 [J]. 技术与市场, 2025, 32 (06): 80-83+87.
- [3] 许胜贤. 基于大模型大数据的高寒地区电网线路覆冰预警系统设计 [J]. 产业创新研究, 2024 (06): 97-99.