

# 电线覆冰预报模型研究综述

庄文兵<sup>1</sup> 张海斌<sup>2</sup> 赵宏宇<sup>3</sup> 吴世新<sup>3</sup> 万明阳<sup>4</sup>

(1 国网新疆电力公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830001; 2 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 400000;  
3 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070; 4 象辑知源(武汉)科技有限公司, 北京 100084)

**摘要:** 我国地域广阔、地形复杂、气候多变, 输电系统面临相当严重的覆冰灾害威胁。导线覆冰导致的电力系统事故, 严重影响了正常的国民经济生活。为了保证电网系统安全可靠的运行, 有必要对输电线路导线覆冰的预测模型进行深入研究。首先总结了电线覆冰的相关气象因素, 然后列举了一些比较典型的经验和半经验模型, 综合阐述了覆冰物理过程的流体力学和热力学理论, 最后对国内的覆冰预测模型研究现状做了简要介绍。

**关键词:** 电线覆冰, 物理模型, 统计模型

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.02.001

## Review of the Research for Powerline Icing Prediction

Zhuang Wenbing<sup>1</sup>, Zhang Haibing<sup>2</sup>, Zhao Hongyu<sup>3</sup>, Wu Shixin<sup>3</sup>, Wan Mingyang<sup>4</sup>

(1 Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011 2 Electric Power Research Institute, State Grid  
Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400000 3 Beijing State Grid Fuda Science & Technology  
Development Co.Ltd., Beijing 100070, 4 Xiangjizhiyuan (Wuhan) Technology Co.Ltd., Beijing 100084)

**Abstract:** China's various territories, complex terrain and changing climate, results in frequent power line icing disaster, which is a serious threat to the normal national economic life. It is necessary to conduct in-depth study of ice coating of transmission line wires to ensure the safe and reliable operation of the power grid system. This paper firstly summarizes the relevant meteorological factors that cause the powerline icing, then enumerates some typical examples of empirical and semiempirical models of ice coating. The hydrodynamics and thermodynamics of the icing process are also described. The advantages and disadvantages of each model are compared and analyzed, and some recently developed statistical forecasting methods are briefly introduced. Finally the research status of domestic powerline icing prediction model is briefly reviewed.

**Keywords:** powerline icing, physical model, statistical model

## 0 引言

电线覆冰是空气中的过冷水滴、雾滴以及冻雪附着在0℃左右或以下的导线上形成的冻结物<sup>[1-2]</sup>。近年来, 在全球气候变暖背景下, 极端天气气候事件引起的气象灾害频数和强度呈增加趋势, 覆冰作为一种特殊的气象灾害, 给世界各地许多电网线路的安全运行造成了严重影响<sup>[3-4]</sup>。2008年初我国南方特大雨雪冰冻灾害期间, 电线积冰造成南方地区电网大面积损毁、电力供应中断, 直接经济损失上千亿元, 对社会正常生活造成了巨大影响<sup>[5]</sup>。深入研究电线覆冰的形成机理及其天气成因, 建立有效的覆冰灾害预警预报方法, 对经济社会可持续发展具有重要的现实意义。

从20世纪50年代至今, 国内外科研人员对电网覆

冰的气象条件和形成机理进行了细致的研究<sup>[6-8]</sup>, 形成了对覆冰形成物理过程的较为完善的认识, 在此基础上发展出多种预测覆冰厚度的理论模型, 并在覆冰监测<sup>[9-10]</sup>、导线除冰<sup>[11]</sup>等技术领域都取得了长足的进步。本文对于经典覆冰模型的发展历程和近年来国内的覆冰预测模型研究现状进行了综合阐述。

## 1 电线覆冰成因分析

### 1.1 覆冰分类

电线覆冰按照形成的气象条件可以分为雨淞、雾淞、混合淞、雪淞四类。雨淞是指大气中的过冷水滴在导线的迎风面形成的清澈光滑透明的覆冰, 密度为0.5~0.9 g/cm<sup>3</sup>, 对电网系统的威胁最大。雾淞是大气中的水汽在过饱和时附着或升华凝结, 在导线上形成放射状的结晶, 密度约为0.1~0.3 g/cm<sup>3</sup>, 雾淞形成时的气温通常小于-5℃。混合淞则是雨淞和雾淞混合冻结形成的不透明或半透明覆冰, 密度介于雨淞和雾淞之间。雪淞是由自然降雪粘附在导线上形成的覆

收稿日期: 2016年11月9日; 修回日期: 2016年12月23日

第一作者: 庄文兵(1984—), Email: dommo@126.com

资助信息: 国家电网公司总部科技项目《电网气象监测网组网及应用关键技术研究》资助

冰,雪淞的密度小,结构松散,容易破碎,造成的危害较小,故对雪淞的专门研究较少。

## 1.2 影响因素

影响覆冰形成的自然因素包括气象因素和地形因素,而地形因素从根本上是通过影响气温和大气环流等气象条件从而对电线覆冰产生影响的。从气象学的角度看,影响覆冰的微气象因素主要有温度、降水、湿度、风速和风向等。

一般而言,气温介于 $-5\sim 0^{\circ}\text{C}$ 最容易形成覆冰,若气温小于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时观察到的覆冰现象极少,这是由于温度过低将导致空气中的过冷水含量减少。降水量和湿度决定了大气中的过冷水滴含量,因而与导线覆冰厚度呈正相关。风速对覆冰的影响在于与导线垂直方向的风速越大,单位时间内运送到导线上的过冷水滴数量越多,水滴碰撞速度越大,覆冰增长越快。但另一方面,当风速大到一定程度时,过冷水滴还未结冰就会被风吹走,导致冻结系数下降,从而使得覆冰增长率减缓。大风的另一个危害在于导线覆冰后会在风力下持续振荡,造成导线断裂和跳闸。

除气象和地形等自然因素以外,导线本身的悬挂高度、线径粗细、电线扭转、电场及电负荷等也会对覆冰的厚度、质量产生影响<sup>[1]</sup>。

## 2 经典覆冰预测模型

电线覆冰是由多种微气象因素决定的综合物理现象,仅从单一的气象要素难以建立准确的覆冰厚度预测模型,需要通过研究电线结冰的物理机制,根据热力学、流体力学等方面的知识建立守恒方程,从而获得覆冰厚度与各类气象要素的综合定量关系。从20

表1 覆冰模型中常见参数的物理意义及单位  
Table 1 Physical meanings and units of common parameters in ice models

符号	物理意义	单位
$m$	单位长度导线覆冰质量	g/m
$R_0$	导线原始半径	mm
$R$	覆冰后导线半径	mm
$\Delta R$	覆冰厚度	mm
$t$	覆冰时间	h
$T$	气温	$^{\circ}\text{C}$
$v$	风速	m/s
$\phi$	风向与导线夹角	rad
$P$	单位时间降雨量	mm/h
$H_g$	降水量	mm
$H_v$	液水当量	mm
$w$	液态水含量	$\text{g}/\text{m}^3$
$\rho_0$	液态水密度	$\text{g}/\text{m}^3$
$\rho_i$	覆冰密度	$\text{g}/\text{m}^3$
$a$	液滴中值半径	cm

世纪50年代起,国内外的学者对覆冰形成的物理过程和影响因素进行了大量研究,提出了多种覆冰预测模型,本节对其中较为经典的模型进行简要评述。各模型中常见参数的物理意义和量纲统一列于表1中。

### 2.1 经验模型

在覆冰研究早期,由于对覆冰成因的认识不够全面,研究者通常是根据试验观测结果提出的经验模型。

#### 2.1.1 Lenhard 模型<sup>[12]</sup>

Lenhard模型假设覆冰增长仅与降水量呈线性关系

$$M = C_1 + C_2 H_g, \quad (1)$$

由于忽略了气温和风速的影响,该模型过于简单,不能反映覆冰发生时电路沿线复杂气象状况的影响。

#### 2.1.2 Imai 模型<sup>[13]</sup>

Imai模型认为覆冰质量受导线传热过程控制,覆冰质量的变化率与气温相反数呈正比,得到如下的冰厚预测模型

$$R^{3/2} = C\sqrt{vR}(-T)t, \quad (2)$$

式中, $R$ 为覆冰后的导线半径, $v$ 为风速, $T$ 为气温, $t$ 为覆冰时间。该模型忽略了降水和空气湿度的影响,当温度接近 $0^{\circ}\text{C}$ ,由于常数 $C$ 值偏小,往往会低估覆冰荷载。而模型中的湿增长条件在气温低于 $-5^{\circ}\text{C}$ 时并不成立,因而在极端低温条件下又容易高估覆冰厚度。

#### 2.1.3 McComber 雾凇模型<sup>[14]</sup>

McComber模型是根据华盛顿山上的雾凇试验提出的经验公式

$$M = M_0 e^{kt}, \quad (3)$$

式中, $M_0$ 为 $t=0$ 时单位导线上的覆冰质量。McComber模型假定结冰厚度随时间呈指数式增长,其中指数 $k$ 由气温、风速、液水含量、液滴直径、冰重等参数计算得到。尽管McComber指出该模型与试验数据拟合较好,但实际上公式中的常数 $k$ 具有很大的可变性,在实际应用中较难确定。另一方面,McComber模型只能预测覆冰的增长趋势,而没有反映覆冰形成和消融的过程,因而实用价值较低。

### 2.2 干增长数值模型

干增长数值模型根据大气液态水和导线覆冰的质量守恒建立方程,对过冷水滴在导线附近的运动轨迹和热力学性质涉及较少。干增长模型的前提假设是,与导线接触的过冷水滴全部冻结成冰,即过冷水滴的冻结系数为1,且在这类模型中通常没有明确提出碰撞率的概念,难以反映复杂的覆冰物理过程。但另一方面,由于一些干增长模型的输入数据能够直接测量得到,且多数情况下能够准确预测覆冰趋势,这类模

型在实际操作中也得到了广泛的应用。

### 2.2.1 Chaine 模型<sup>[15]</sup>

Chaine模型假设环境温度接近或低于0℃，与导线接触的过冷水滴全部在导线表面冻结成冰，则导线覆冰的当量径向厚度为

$$\begin{cases} \Delta R = \left[ \frac{R_0 k}{2} \sqrt{H_g^2 + H_v^2 + R_0^2} \right]^{1/2} - R_0, \\ H_g = Pt, H_v = wvt \end{cases} \quad (4)$$

其中， $k$ 是人为引入的修正系数，与气温和导线半径有关。相比于早期的覆冰理论模型，Chaine模型综合考虑了气温、降水、风速、大气湿度等因素的影响，但其主要缺点在于公式中的修正系数 $k$ 较难确定。有其他文献指出，Chaine模型中的修正系数 $k$ 实际上依赖于覆冰厚度 $\Delta R$ ，因此公式(4)实际上是一个隐式模型，无法直接应用<sup>[32]</sup>。Chaine模型中将覆冰来源划分为两类，即降水与导线直接碰撞形成覆冰，以及过冷水滴与导线侧面碰撞结冰，这种划分方法也被后来的一些数值模型所采纳。

### 2.2.2 Goodwin 模型<sup>[16]</sup>

Goodwin模型默认过冷水滴的收集系数为1，覆冰质量增长率正比于风速、液态水含量和导线半径，进而导出覆冰厚度公式：

$$\Delta R = \frac{\rho_0}{\rho_i} \frac{H_g}{\pi} \sqrt{1 + \left( \frac{v}{v_d} \right)^2}, \quad (5)$$

式中， $v_d$ 为雨滴降落速度。Goodwin模型与Chaine模型的出发点较为相似，但Goodwin模型给出了在物理概念上自洽的覆冰厚度预测公式。相比于之前的各类经典覆冰数值模型，Goodwin模型能够达到较高的准确性，但由于其为干增长模型，当温度接近0℃时难以反映真实的覆冰物理过程。

### 2.2.3 Jones 简单模型<sup>[17]</sup>

Jones模型假设导线为无限长圆柱体且导线表面均匀覆冰，考虑降雨量和风速的影响，根据液态水向覆冰转化过程中的质量守恒，提出一种计算最大可能标准冰厚的简单模型：

$$R_{eq} = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^N \left[ (P_j \rho_0)^2 + (3.6 w_j v_j)^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

式中的求和号为逐小时求和。按照Best提出的经验公式，液态水含量 $w$ 通过降雨量 $P$ 计算得出

$$w_j = 0.067 P_j^{0.846}. \quad (7)$$

Jones利用Springfield的历史观测数据进行检验，将简单模型和四种经典模型进行对比，发现简单模型与Makkonen模型的预测结果十分接近。Jones模型的

缺点除了其干增长假设以外，还在于忽略了导线本身直径对覆冰厚度的影响。尽管如此，由于Jones模型所采用的参数易于获取，并且能够较准确地预测覆冰增长率，在国外常常被应用于实际的覆冰数值模式预报。Musilek<sup>[18-19]</sup>等在其覆冰增长预报系统中，引入冻雨因子<sup>[20]</sup>对Jones模型进行修正，并采用中尺度数值预报模式WRF生成的气象预报数据作为输入值，计算出的标准覆冰厚度与实际测量值的均方误差小于2mm。

### 2.3 覆冰过程的物理模型

上述一类干增长模型的共同特点为：

- 1) 过冷水滴的运动路径为直线，水滴与导线的碰撞面积等于沿导线直径的剖面面积；
- 2) 与导线碰撞的过冷水滴将全部驻留在导线表面形成覆冰；
- 3) 导线覆冰形状为均匀的圆柱形或椭圆形。

这些假设简化了覆冰计算过程，具有一定的实用性，但并没有深入全面地反映导线结冰的物理过程。在较为严密的导线覆冰物理模型中，通常引入3个重要的物理参量：碰撞率 $\alpha_1$ 、捕获率 $\alpha_2$ 和冻结系数 $\alpha_3$ （表2）。覆冰物理过程模型的基本公式为<sup>[23]</sup>

$$\frac{dm}{dt} = 2\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w v R \sin \phi. \quad (8)$$

表2 覆冰理论模型的重要物理参量

Table 2 Important physical parameters of theoretical model of icing

物理参量	物理意义
碰撞率	气流中过冷水滴与导线的碰撞幅度和覆冰导线直径之比
捕获率	驻留在导线表面的水滴量与所有碰撞导线表面的过冷水滴之比
冻结系数	冻结水滴量与驻留在导线表面的水滴总量之比

前述Goodwin模型本质上是式(8)在 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ 时的特例。在混合淞和雨淞覆冰过程中，捕获率 $\alpha_2$ 通常等于1，因此对于覆冰物理过程的研究主要是集中于对碰撞率和冻结系数的研究，前者由流体力学规律确定，而后者则通过求解热力学方程计算得出。

#### 2.3.1 流体力学模型

如图1所示，导线的存在会使气流的流线扭曲，

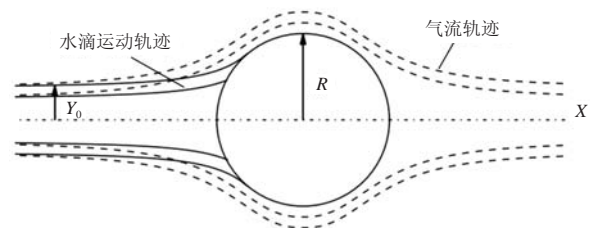


图1 导线附近气流和水滴运动轨迹  
Fig.1 Trajectories of airflow and water droplets near the conductor

从而改变气流中水滴的流动方向。设运动轨迹与导线相切的水滴在无穷远处与X轴的距离为 $Y_0$ ，则碰撞系数定义为

$$\alpha_1 = Y_0 / R. \quad (9)$$

在20世纪40年代，Langmuir和Blodgett利用流体力学方法计算出气流中水滴绕圆柱运动的轨迹<sup>[21]</sup>。为简化计算过程，该模型中做出如下假设：①水滴在足够远处的运动速度 $v_0$ 与气体流速相等；②水滴为球形，不发生形变；③水滴所受重力忽略不计。设气体流速和水滴速度矢量分别为 $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{v}$ ，以 $v_0$ 作为速度单位，即令 $\mathbf{u}' = \mathbf{u} / v_0$ ， $\mathbf{v}' = \mathbf{v} / v_0$ ， $\tau = tv_0 / R$ ，则导线附近水滴的无量纲运动方程为

$$k \frac{d\mathbf{v}'}{d\tau} = \frac{c_F Re}{24} (\mathbf{u}' - \mathbf{v}'), \quad (10)$$

式中， $c_F$ 为水滴与气流作相对运动遇导线阻滞时的空气阻尼系数， $k$ 为水滴的惯性参数（斯托克斯数）， $Re$ 为水滴在气流中运动的雷诺数。雷诺数和惯性系数与水滴半径 $a$ 、水滴密度 $\rho_0$ 、空气密度 $\rho_a$ 、空气粘滞系数 $\mu$ 以及覆冰导线半径 $R$ 具有如下关系

$$Re = \rho_a a |\mathbf{u} - \mathbf{v}| / \mu, \quad (11)$$

$$k = \rho_0 a^2 v / (9\mu R). \quad (12)$$

通常情况下，方程（10）没有解析解，其数值计算结果表明，过冷水滴碰撞率与水滴惯性系数 $k$ 呈正相关，惯性系数较大的水滴不容易偏离其直线路径，因而与导线的碰撞概率更大。由式（12）可以得知，如果导线半径越小，水滴直径和风速越大，则水滴碰撞率越大。

Langmuir和Blodgett以及后来的研究者参考上述模型提出了一些计算碰撞系数的经验公式，从而免去了对于气流场和水滴轨迹的复杂计算过程。主要代表有Stallabrass公式<sup>[22]</sup>，Makkonen公式<sup>[23]</sup>和Finstad公式<sup>[24]</sup>等，这些公式与严格数值解的误差尚在可接受的范围内，在覆冰研究中得到了广泛应用。

以上经典碰撞率理论的不足之处在于：①将气流场看作理想层流，而实际上湍流的存在会影响覆冰的最终结果；②将覆冰导线截面看作均匀的圆形，忽略了覆冰造成的导线表面形貌改变对气流和水滴路径产生的影响；③导线附近的电场会使水滴因极化而荷电，从而同时受到空气粘滞力、自身重力和电场力的作用，而在上述模型中仅考虑了空气粘滞力的作用。随着计算机硬件和数值模拟技术的发展，这些问题部分得到了解决。从20世纪80年代起，飞机覆冰领域的研究者开发出一系列覆冰计算软件，如CANICE<sup>[25]</sup>、LEWICE<sup>[26]</sup>等，但这些软件较少应用于导线覆冰研究

上。2004年Fu等开发出专门的电线覆冰数值模拟软件<sup>[27-28]</sup>，采用计算流体动力学求解气流场，用拉格朗日或欧拉算法求解局部碰撞率。该模型模拟了导线覆冰的形状，并考虑了导线在覆冰过程中的扭转问题，具有较高的物理逼真性，实际预测效果得到了大幅提升。

### 2.3.2 热力学模型

过冷水滴在导线表面冻结的过程实质是一个热平衡过程，冻结系数可由覆冰表面的热平衡方程决定。Lozowski, Makkonen等对覆冰表面热平衡过程进行了深入全面的研究，建立了如下热平衡方程<sup>[23]</sup>

$$q_f + q_v + q_k + q_a + q_n + q_R = q_c + q_e + q_l + q_s + q_i, \quad (13)$$

式中， $q_f$ 为过冷水滴冻结时释放潜热； $q_v$ 为气流与导线的摩擦热； $q_k$ 为水滴碰撞动能； $q_a$ 为水滴结冰后从冰点温度 $T_F$ 降到冰面稳态温度 $T_s$ 释放的热量； $q_n$ 为日光短波辐射加热； $q_R$ 为传输电流焦耳热； $q_c$ 为自然对流热损失； $q_e$ 为液水蒸发或冰升华导致的热损失； $q_l$ 为过冷水滴从环境温度 $T_a$ 升温至冰点温度 $T_F$ 吸收的热量； $q_s$ 为长波辐射损失热量； $q_i$ 为传热损失。Makkonen等给出了各项热流量的详细计算公式<sup>[23, 29-31]</sup>。

覆冰湿增长过程的必要条件是冰面温度 $T_s$ 等于 $0^\circ\text{C}$ ，将这一条件与各热流项的表达式代入热平衡方程中，则可以计算出覆冰冻结系数 $\alpha_3$ ，此时还需对计算结果分3种情况进行讨论。若计算结果满足 $0 < \alpha_3 \leq 1$ ，则覆冰过程确实为干增长过程。若 $\alpha_3 \leq 0$ ，则表明在相应环境条件下，过冷水滴不会在导线表面继续结成覆冰。若解出 $\alpha_3 > 1$ ，则覆冰过程为干增长过程，与导线碰撞的过冷水滴不仅全部冻结，且有能力使冰面温度 $T_s$ 降低至 $0^\circ\text{C}$ 以下，此时可令 $\alpha_3 = 1$ 代入方程（13）中来求解实际冰面温度值。对导线覆冰热平衡方程的计算结果表明，湿增长条件下冻结系数受环境温度、风速、液态水含量、水滴直径、导线直径、导线电流的影响。其中环境温度、风速、液态水含量、水滴大小和导线电流的增长都会引起冻结系数下降，而导线直径与冻结系数的关系在一些情况下存在极小值。

传统覆冰理论认为，在湿增长过程中未冻结的液态水将从导线上滴落，不会对后续覆冰过程产生影响。Makkonen在进一步考察实际覆冰形状后指出，在雨淞覆冰过程中，未冻结的过冷水滴不会立即滴落，而是流向导线底部，在流动过程中逐渐冻结形成冰棱，进而增大与空气中过冷水滴的接触面积，使得覆冰率进一步增长<sup>[32]</sup>。这一结论在利用蒙特卡罗法进行颗粒随机行走仿真的三维形态生成模型中得到了验证

和发展<sup>[33]</sup>。

与早期的经验覆冰模型和仅考虑质量守恒的干增长模型相比，以 Makkonen 模型为代表的理论模型深入地考察了覆冰过程中的物理细节，能够精确地计算出导线覆冰量与各类环境参量的函数关系。尽管 Makkonen 模型也存在对实际物理过程的简化，例如没有考虑电场作用和导线晃动等因素，但已经能够取得较为理想的试验效果。利用在自然环境中，液滴半径谱等参数较难精确测量，成为限制模型准确率的主要因素。随着传感技术的发展和天气数值预报精度的提高，对大气环境参数的监测和预报更加准确，各类覆冰模型的预测能力有望得到进一步提升。

### 3 国内覆冰模型研究进展

#### 3.1 物理数值模型

国内对覆冰物理模型的研究始于20世纪50年代末期<sup>[34]</sup>。由于电线积冰问题的重要性，水电部西南设计院于1964年底建立了首个观冰站，进行了连续4年的积冰观测。谭冠日<sup>[35]</sup>、江祖凡<sup>[36]</sup>等对这些资料进行了分析，在积冰厚度与高度、风向、电线直径的关系和雾凇形成的气象条件等方面取得了一些成果。在 Makkonen 模型的理论基础上，蒋兴良等对电线积冰物理机制，包括碰撞率、冻结系数、覆冰密度和干湿增长转变的临界条件等进行了比较详细的分析，给出了一套相对完整的覆冰计算理论体系<sup>[1, 37-38]</sup>。

近年来国内覆冰灾害频发，导致电力系统瘫痪不断，引起了国内学者的广泛关注，在覆冰预报、监测和除冰领域进行了大量研究工作。现有覆冰物理模型的研究进展可分为3个部分，一是对经典覆冰理论的物理细节进行进一步整理和完善；二是将已有的覆冰模型与气象站可测量的常规气象要素相结合，使其能够充分应用于本地的覆冰预报业务；三是利用已有的覆冰计算理论，对输电线路负载和故障概率进行评估。

刘春城在已有覆冰理论基础上，对雨凇模型的收集系数、冻结系数和覆冰形状做了一定程度的简化，分析了水滴中值半径、风速以及导线直径变化时覆冰增长随着时间的演变规律，并取得了和 Makkonen 模型相近的效果<sup>[39]</sup>。梁曦东等在经典碰撞率模型中加入了电场作用项，采用边界元法计算气流场，对导线表面单元的局部碰撞率和局部冻结系数进行单独计算，开发了导线覆冰形貌的时变仿真模型<sup>[40]</sup>。该模型能够得到随时间变化的覆冰形貌、密度分布和覆冰质量，与已有的模拟和试验结果都符合得较好，具有较高的工程应用价值。朱永灿等在其数值分析模型中做出了相似

的工作，由于考虑了未冻结液滴的溢流过程，得出的冰形轮廓更加圆滑<sup>[41]</sup>。

传统覆冰物理模型中用到诸如液态水含量、液滴半径谱、液滴撞击速度之类的因子，由于无法在通过常规气象站观测得到，不能直接应用于工程设计。针对这一问题，吴息等利用四川省二郎山观冰站的观测数据建立了基于常规气象资料的导线覆冰模型<sup>[42-43]</sup>，根据已有的观测数据，对覆冰密度与气温，冻结系数与风速，以及液水含量与能见度、大气湿度的函数关系进行非线性拟合并代入覆冰增长方程，从而得到冰厚的时间序列值。该模型是一个半经验模型，其对于覆冰密度等中间参量的非线性拟合并不十分精确，但冰厚拟合值与实测值的相关系数达到0.834，已经能够较好地反映覆冰厚度的变化趋势。由于该模型仅利用了一处观测站的资料，其能否适用于其他地形条件下的覆冰预报，还需要进一步深入研究。

在覆冰灾害风险评估模型方面，谢云云等<sup>[44]</sup>根据 Jones 简单模型计算雨凇覆冰厚度，进而得到导线冰风总荷载和最大应力，对覆冰过重、导线舞动和绝缘子闪络引起的线路故障概率分别进行了评估。该模型中计入了地理环境特征的作用，但没有考虑融冰因素对故障率的影响，这一问题在朱斌等的研究中得到了完善<sup>[45]</sup>。其改善方法为，在每一次计算迭代的过程中，先利用热平衡方程（13）计算冰面温度 $T_s$ ，若 $T_s > 0$ 则表明导线覆冰处于外部融化状态，覆冰增量为负数。此外，该模型中还考虑了由于导线焦耳热引起的内部融冰过程。对实际输电线路进行的算例分析表明，上述模型计算出的故障概率曲线与输电线路的实际故障情况基本相符，因而具有较高的实用价值。

#### 3.2 统计预测模型

相比于根据物理规律建立的覆冰数值预测模型，近年发展起来的统计预测模型绕过具体的物理过程，通过对实际气象观测资料和覆冰资料进行统计分析，从数据关联性出发建立由气象因子到覆冰厚度的定量映射关系。尽管统计模型本质上仍是一类经验模型，但其输入参量能够通过常规气象要素观测或数值天气预报模式直接或间接获取，因而在碰撞率和冻结系数较难计算，并且相关气象数据种类足够多、样本量足够大的情况下，能够取得和经典物理模型相近甚至更佳的预测效果。统计模型通常以覆冰厚度作为输出结果，而实际容易测量的物理量为覆冰质量，因此通常的做法是先根据实测冰重计算标准冰厚<sup>[46]</sup>：

$$\Delta R = \left[ \frac{M}{0.9\pi L} + R^2 \right]^{1/2} - R. \quad (14)$$

较早期的统计方法通过多元回归建立覆冰定量预测模型<sup>[47-49]</sup>。在廖玉芳建立的湖南电线覆冰厚度估算模型中，其输入变量除了地面常规气象要素外，还包含低层探空资料的温度信息以及海拔、坡度、坡向等地形因子。该模型在海拔高度小于1000 m时的平均绝对误差小于2 mm，但在海拔高于1000 m时表现较差。

由于电线覆冰本质上是复杂的非线性过程，利用线性拟合的手段难以对覆冰厚度增量进行精确拟合。近年来随着机器学习领域的迅速发展，神经网络<sup>[50]</sup>和支持向量机<sup>[51]</sup>等非线性模型被广泛应用于构建覆冰预测模型。殷水清等利用三层BP神经网络对全国范围内48年电线结冰观测数据和相关气象要素数据进行分析，将前期冰冻日数，预报前1天的日最低气温、日相对湿度、日平均风速和日降水量作为神经网络输入，将结冰厚度分为6个等级进行分类预测，达到了81.3%的准确度，但对于极端高值低估明显<sup>[52]</sup>。传统BP神经网络常常存在着诸如收敛速度慢、易陷于局部极小值和过拟合等方面的缺陷，当学习的样本量较小或数据质量较差时，相比简单模型并不占优势<sup>[49]</sup>。对此的一个改善方法是，先利用遗传算法或粒子群算法等优化算法对神经网络的参数空间进行全局搜索，再利用BP算法寻找最优解，从而加快网络学习速率，避免陷入局部最小值<sup>[53]</sup>。

支持向量机(SVM)是一种建立在统计学习理论的VC维理论和结构风险最小原理基础上的监督学习模型，可用于分类和回归分析。相比传统BP神经网络，SVM算法过拟合风险和人工调参成本相对较低，训练时间快，在小样本模式识别中具有独特的优势，因此有较多的覆冰统计模型采用了这种算法。下面对其基本原理进行简要介绍。

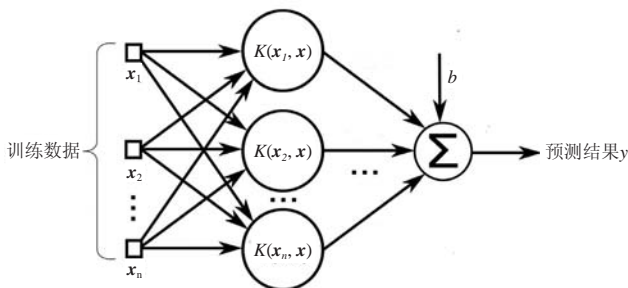


图2 支持向量机示意图  
Fig. 2 Sketch map of SVM

SVM的出发点是利用非线性映射 $\phi$ 将输入向量映射到高维特征空间，使得分属不同类别的数据能够在高维空间中利用超平面 $w^T\phi(x)+b=0$ 线性分割开来。对于回归问题，则是希望在高维特征空间中寻找结构

风险最小化的回归函数 $f(x)=w^T\phi(x)+b$ ，能够满足以下最优化条件

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2} \|w\|^2 \\ \text{s.t. } |y_i - w^T\phi(x_i) - b| < \varepsilon, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (15)$$

由于高维空间中内积的计算复杂度较高，SVM理论中通常寻找一个核函数 $K(x_1, x_2)=(\phi(x_1), \phi(x_2))$ 来代替特征空间中的内积运算。模型预测效果的关键在于核函数的选取，最常用的一类核函数为径向基函数：

$$K(x, x_i) = e^{-\gamma(x-x_i)^2}, \gamma > 0. \quad (16)$$

对方程(13)的直接求解较为困难，通过引入拉格朗日乘子 $\alpha_i$ 和 $\alpha_i^*$ ，可以将原始参数空间中的优化问题转化为对偶空间中的优化问题，求解得到的回归函数 $f(x)$ 可以表示为核函数的线性组合

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b. \quad (17)$$

戴栋等<sup>[54]</sup>在其基于支持向量机的覆冰回归模型中，选取环境温度、湿度、风速和前一段采样时刻的覆冰数据作为模型输入，对贵州电网的3个覆冰过程进行了短期预报模拟，结果显示该模型在1 h内的滚动预测效果较好，而更长时间的预测效果较差。

上述模型的一个明显缺陷是输入数据的维度较小，从经典物理模型的角度来看，仅依靠3种气象数据的确难以对覆冰厚度进行精确估计。尽管如此，在微气象数据的种类和数量短期内难以迅速增长的情况下，利用已有微气象数据人为构造特征变量，仍有提高模型准确率的可能。例如在侯雨伸等<sup>[55]</sup>的统计模型中，初始输入变量仍是气温、湿度和风速数据，但是在训练SVM模型之前，先根据历史冰厚数据的变化量，将气象过程分为覆冰增长、覆冰维持、覆冰消融3个集合，并根据气象过程样本数据与各集合中心点的马氏距离来确定各样本的模糊隶属函数。在训练SVM时，除了原始气象数据和上一时刻的覆冰厚度以外，当前时刻的3个隶属度函数也作为特征变量一并输入，使得模型输入向量的维度增加到了7维，并且预测结果与实测冰厚的相对误差均值从22.66%降低至10.16%。在考虑气象参量的权重之后，相对误差均值能够进一步降低至6.62%。

除上述方法外，利用粒子群算法调参<sup>[56]</sup>以及利用KNN算法预先提取临近样本<sup>[57]</sup>的模型也取得了比传统SVM更优的预测效果。由于这些统计模型都只采用了少数几个地理位置的观测数据进行训练和检验，仍有必要进行深入研究来增强模型的准确性和泛化能力。

## 4 总结与讨论

本文对电线覆冰的经典物理概念和国内覆冰预测模型的研究进展进行了综合介绍。

诸如Imai模型的一类经验模型,体现了影响覆冰厚度的部分气象因素,但既不能反映电线覆冰的物理过程,又无法准确预测覆冰厚度。20世纪70—90年代提出的一些干增长模型建立在过冷水滴碰撞率和冻结系数为1的假设上,同样不能反映详细的覆冰物理过程,但其中仍有一些模型预测效果较好,如Jones简单模型,其计算过程相对简单且输入参量易于测量,因而得到了广泛应用。以Makkonen模型为代表的一类理论模型,利用流体力学和热力学理论严格计算过冷水滴的碰撞率和冻结系数,对覆冰的干湿增长过程有清晰的判定,已经形成了较为成熟的理论体系,并且得益于计算机仿真技术的发展,对于覆冰形状和覆冰质量能够给出非常精确的模拟结果。由于理论模型中的部分参数在自然环境下较难精确测量,实际覆冰预报的准确率仍有待进一步提升。

统计方法根据可观测和可预报的微气象数据,利用多元线性回归或神经网络、支持向量机等机器学习算法建立覆冰预测模型,理论上其精确程度低于严格的物理模型,但在实际的覆冰预测业务能够充分发挥已有数据的价值,因此可能取得更好的效果。由于目前国内电网微气象站和观冰站数量较少,现有统计模型研究通常只应用了少量微气象数据进行拟合,其准确性和全面性有待进一步研究。虽然一些数据处理方法能够使得模型准确率有所提升,但统计模型的实际应用最终仍然依赖于积冰过程和气象因子的观测资料的大量积累。

在已有的研究工作中,对覆冰物理模型的研究和对统计模型的研究大多是独立的,很少有将二者结合起来的尝试,这可能是未来覆冰预测模型的一个发展方向。此外,无论是物理模型还是统计模型,若要提升预报时效性,均依赖于电网线路附近的局地微尺度天气预报。因此提升现有微尺度模式的准确性,开发精细化的数值天气预报产品,对于电线覆冰模型的实际应用具有极其重要的意义。

### 参考文献

- [1] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京:中国电力出版社,2002.
- [2] 中国南方电网公司. 电网防冰融冰技术及应用. 北京:中国电力出版社,2010.
- [3] Jones K F, Ramsay A C, Lott J N. Icing severity in the December 2002 freezing-rain storm from ASOS data. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(7): 1630-1644.
- [4] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨. *高电压技术*, 2008, 34(2): 215-219.
- [5] 陆佳政,蒋正龙,雷红才,等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析. *电力系统自动化*, 2008, 32(11): 16-19.
- [6] 黄新波,欧阳丽莎,王娅娜,等. 输电线路覆冰关键影响因素分析. *高电压技术*, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [7] Farzaneh M, Savadjiev K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [8] Lozowski E P, Makkonen L. Fifty years of progress in modelling the accumulation of atmospheric ice on power network equipment. *Proc Eleventh International Workshop on Atmospheric Icing on Structures*, Montreal, 2005. [http://iwais.compusult.net/html/IWAIS\\_Proceedings/IWAIS\\_2005/Papers/IW59.PDF](http://iwais.compusult.net/html/IWAIS_Proceedings/IWAIS_2005/Papers/IW59.PDF).
- [9] 黄新波,孙钦东,程荣贵,等. 导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统. *电力系统自动化*, 2007, 31(14): 98-101.
- [10] 曹永兴,张昌华,黄琦,等. 输电线路覆冰在线监测及预警技术的国内外研究现状. *华东电力*, 2011, 39(1): 96-99.
- [11] 刘建伟,周娅,黄祖钦,等. 高压输电线路除冰技术综述[J]. *机械设计与制造*, 2012, (5): 285-287.
- [12] Lenhard R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires. *Bull Amer Meteor Soc*, 1955, 36 (3):1-5.
- [13] Imai I. Studies on ice accretion. *Researches on Snow and Ice*, 1953, 3(1): 35-44.
- [14] McComber P, Govoni J W. An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at Mount Washington. *Proceedings of the Forty-second Annual Eastern Snow Conference*, Montreal, Canada, 1985.
- [15] Chainé P M, Castonguay G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors. *Industrial Meteorology Study IV*, Environment Canada, Toronto, 1974.
- [16] Goodwin III E J, Mozer J D, DiGioia Jr A M, et al. Predicting ice and snow loads for transmission line design. *Pennsylvania Power and Light Co Allentown Pa*, 1983.
- [17] Jones K F. A simple model for freezing rain ice loads. *Atmos Res*, 1998, 46(1): 87-97.
- [18] Musilek P, Arnold D, Lozowski E P. An ice accretion forecasting system (IAFS) for power transmission lines using numerical weather prediction. *SOLA*, 2009, 5: 25-28.
- [19] Pytlak P, Musilek P, Lozowski E, et al. Evolutionary optimization of an ice accretion forecasting system. *Mon Wea Rev*, 2010, 138(7): 2913-2929.
- [20] Ramer J. An empirical technique for diagnosing precipitation type from model output. *International Conference on Aviation Weather Systems*, 5th, Vienna, VA, 1993: 227-230.
- [21] Langmuir I, Blodgett K. Mathematical investigation of water droplet trajectories. *Atmospheric Phenomena*, 1946: 335-347.
- [22] Stallabrass J R. *Trawler icing: a compilation of work done at NRC*. Ottawa: National Research Council of Canada, 1980.
- [23] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires. *J Clim Appl Meteor*, 1984, 23(6): 929-939.
- [24] Finstad K J, Lozowski E P, Gates E M. A computational investigation of water droplet trajectories. *J Atmos Ocea Tech*, 1988, 5(1): 160-170.
- [25] Franc-Para, Morency, Tezok F, et al. Anti-icing system simulation using CANICE. *J Aircraft*, 1999, 36(6): 999-1006.
- [26] Wright W B. User Manual for the NASA Glenn Ice Accretion Code LEWICE. Version 2.2.2. NASA: 2002.
- [27] Fu P. Modelling and simulation of the ice accretion process on fixed or rotating cylindrical objects by the boundary element method. *Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi*, 2004.
- [28] Fu P, Farzaneh M, Bouchard G. Two-dimensional modelling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 46(2): 132-146.
- [29] Lozowski E P, Stallabrass J R, Hearty P F. The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part I: A simulation model. *J Clim Appl Meteor*, 1983, 22(12): 2053-2062.
- [30] Cansdale J T, Gent R W. *Ice Accretion on Aerofoils in Two-Dimensional Compressible Flow-A Theoretical Model*. Royal Aircraft Establishment Technical Report, 1983, 82128.

(下转19页)

理想,如果有更大范围的地形数据,能将这几个点置于网格中心位置,效果应该会有所提高。

本文通过研究数值模式和WRF/CalMet融合两种预报方法,对新疆地区大风灾害过程进行预报,并与实况进行对比分析。研究显示,当研究站点设置在降尺度模拟网格中心位置时,WRF/CalMet融合预报方案能够修正数值模式预报的误差,对大风出现和结束的时间预报更为准确,但当站点所在位置在降尺度网格边缘时,模拟效果较差。本文局限于地形数据的覆盖面积及土地利用数据的分辨率,在CalMet降尺度诊断中的空间分辨率最高只能为1 km,地形数据只能覆盖一部分电网微气象站点。如果能够获得更高分辨率的土地利用数据,进一步降低空间插值带来的误差,或者获得更大覆盖范围的地形数据,从理论上讲,风速诊断准确性会得到进一步提高。本研究表明,融合预报方法既能考虑大尺度、中尺度和微尺度上的动力学过程,又能体现局部地形影响,对于复杂地形地区大风风灾预测、预警、分析有一定的指导意义和实践价值。

#### 参考文献:

- [1] 李艳,成培培,路屹雄,等.典型复杂地形风能预报的精细化研究.高原气象,2015(2):413-425.
  - [2] 张华,孙科,田玲,等.应用WRF模型模拟分析风力发电场风速.天津大学学报(自然科学版),2012(12):1116-1120.
  - [3] 张德,朱蓉,罗勇,等.风能模拟系统WEST在中国风能数值模拟中的应用.高原气象,2008,27(1):202-207.
  - [4] 程雪玲,胡非,曾庆存.复杂地形风场的精细数值模拟.气候与环境研究,2015,20(1):1-10.
  - [5] 程雪玲,胡非.复杂地形网格生成研究.计算力学学报,2006,23(3):313-316.
  - [6] 何晓凤,周荣卫,朱蓉.MM5与CFD软件相结合对复杂地形风能资源模拟初探——以鄱阳湖地区为例.资源科学,2010,32(4):650-655.
  - [7] 方艳莹,徐海明,朱蓉,等.基于WRF和CDF软件结合的风能资源数值模拟试验研究.气象,2012,38(11):1378-1389.
  - [8] 周荣卫,何晓凤,朱蓉.MM5/CALMET模式系统在风能资源评估中的应用.自然资源学报,2010,25(12):2101-2113.
  - [9] 张弛,王东海,巩远发.基于WRF/CALMET的近地面精细化风场的动力模拟试验研究.气象,2015,41(1):34-44.
  - [10] 王文勇,陈楠.山区风场的WRF/CALMET模式模拟.西南交通大学学报,2010,45(6):990-998.
  - [11] 马明亮,张加昆,魏鸿业,等.基于CALMET对复杂地形下风场的模拟研究.青海环境,2010,20(4):181-184.
  - [12] 成培培.复杂地形风能预报的精细化研究.南京:南京信息工程大学,2014.
  - [13] 佐河疆,孙银川,崔洋.WRF模式三种降尺度方案在风功率预报业务中的效果对比.电网与清洁能源,2013,29(10):105-108.
- 
- (上接12页)
- [31] Makkonen L. Heat transfer and icing of a rough cylinder. Cold Regions Science and Technology, 1985, 10(2): 105-116.
  - [32] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation. Atmos Res, 1998, 46(1): 131-142.
  - [33] Lebatto E, Farzaneh M, Lozowski E P. Three-dimensional morphogenetic model of ice accretion on a non-rotating cylinder. Proc 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, 2005.
  - [34] 滕中林. 电线结冰厚度随高度的变化. 天气月刊, 1959.
  - [35] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨. 气象学报, 1982, 40(1): 13-23.
  - [36] 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究. 科学通报, 1983, 15: 928-931.
  - [37] 蒋兴良, 孙才新. 三峡地区导线覆冰的特性及雾凇覆冰模型. 重庆大学学报, 1998, 21(2): 16-19.
  - [38] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 141-145.
  - [39] 刘春城, 刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨凇覆冰模型. 高电压技术, 2011, 37(1): 241-248.
  - [40] 梁曦东, 李雨佳, 张轶博, 等. 输电导线的覆冰时变仿真模型. 高电压技术, 2014, 40(2): 336-343.
  - [41] 朱永灿, 黄新波, 贾建援, 等. 输电导线覆冰生长及影响因素数值分析模型. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 120-125.
  - [42] 吴息, 孙朋杰, 熊海星, 等. 利用常规气象资料建立的导线覆冰模型. 大气科学学报, 2012, 35(3): 335-341.
  - [43] 吴息, 孙朋杰, 刘渝, 等. 基于雾条件下能见度估算的导线覆冰气象模型. 应用气象学报, 2012, 23(6): 755-762.
  - [44] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 32-41.
  - [45] 朱斌, 潘玲玲, 邹扬, 等. 考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 79-84.
  - [46] 电力规划设计总院. 电力工程气象勘测技术规程: DL/T 5158—2012. 北京: 中国计划出版社, 2012.
  - [47] 谢运华. 三峡地区导线覆冰与气象要素的关系. 中国电力, 2005, 38(3): 35-39.
  - [48] 廖玉芳, 段丽洁. 湖南电线覆冰厚度估算模型研究. 大气科学学报, 2010, 33(4): 29-30.
  - [49] 温华洋, 田红, 唐为安, 等. 安徽省电线积冰标准冰厚的气象估算模型. 应用气象学报, 2011, 22(4): 747-752.
  - [50] 闻新, 周露, 李翔, 等. MATLAB神经网络仿真与应用. 北京: 科学出版社, 2003.
  - [51] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机. 自动化学报, 2000, 26(1): 32-42.
  - [52] 殷水清, 赵珊珊, 王遵娅, 等. 全国电线结冰厚度分布及等级预报模型. 应用气象学报, 2009, 20(6): 722-728.
  - [53] 郑振华, 刘建生. 遗传算法与BP神经网络相结合的输电线路覆冰厚度预测方法. 电网与清洁能源, 2014(4): 27-30.
  - [54] 戴栋, 黄薇婷, 代州, 等. 基于支持向量机的输电线路覆冰回归模型. 高压电技术, 2013, 39(11): 2822-2828.
  - [55] 侯雨仲, 王秀丽. 气象过程信息挖掘与输电线路覆冰预测. 西安交通大学学报, 2014, 48(6): 43-49.
  - [56] 尹子任, 苏小林. 基于粒子群算法优化支持向量机的输电线路覆冰预测. 电力学报, 2014, (1): 6-9.
  - [57] 黄宵宁, 许家浩, 杨成顺, 等. 基于数据驱动算法和LS-SVM的输电线路覆冰预测. 电力系统自动化, 2014, (15): 81-86.