

杨军, 谢真珍. 电线积冰物理过程与数值模拟研究进展[J]. 气象, 2011, 37(9): 1158-1165.

# 电线积冰物理过程与数值模拟研究进展<sup>\* 1</sup>

杨 军 谢真珍

南京信息工程大学大气物理与大气环境重点实验室, 南京 210044

**提 要:** 电线积冰对人们的日常生活、电力系统、通信系统等造成了巨大的影响, 人们越来越关注电线积冰的形成条件及物理过程, 包括气象条件、气流动力学、液滴运动轨迹以及热力学过程。通过外场观测、室内实验和数值模拟研究的不断开展, 揭示出电线积冰质量增长过程决定于云降水粒子谱分布、碰撞效率、黏性率、冻结率、碰撞速度和角度等微物理参数, 这些参数又受控于降水率、云雾含水量、温度、湿度、风向、风速等宏观气象条件。通过数值模式已可进行电线积冰量和积冰持续时间的定量研究和预测, 进而在开发垂冰模式和形态模式等方面也取得了新的进展。在总结过去 60 多年来电线积冰物理机制和数值模拟研究主要成果的基础上, 对开展进一步的深入研究进行了展望。

**关键词:** 电线积冰, 碰撞效率, 黏性率, 冻结率, 数值模拟

## Advances of Study on Physical Processes and Modeling of Ice Accretion on Wires

YANG Jun XIE Zhenzhen

The Key Laboratory of Atmospheric Physics & Environment, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** The scientific community that includes meteorologists, physicists and engineers has shown interest in a better understanding of ice accretion formation and related fundamental physics, including atmospheric conditions, surface flow dynamics, droplet trajectory and thermodynamic processes. The rates of ice mass accumulation are highly depended on microphysical factors, including the size distribution of water particles, coefficients of collision, sticking and freezing, and collision speed and angle. These factors are controlled by meteorological parameters, such as precipitation intensity, liquid water contents of cloud and fog, temperature, humidity, wind speed and direction. Such knowledge was built up from field observations and measurements, laboratory studies and model development. The numerical research and prediction on the iceloads and duration of icing get the new advance continuously, and recent numerical models have been developed specifically for icicle and morphogenetic modeling. The physical processes and development of ice accretion models in the past sixty years were summarized. Finally, perspectives for future research are highlighted.

**Key words:** ice accretion on wires, collision efficiency, sticking efficiency, freezing efficiency, numerical modeling

## 引 言

电线积冰是一种气象灾害, 严重影响了电力系

统的正常运行。积冰可导致电线的舞动、杆塔倾斜、倒塌、断线、绝缘子闪络、通讯不畅、停电断水, 给人民的生产生活带来了巨大不便<sup>[1]</sup>, 并给社会经济造成严重损失。

\* 国家科技支撑计划课题(2008BAC48B01)资助

2010 年 4 月 23 日收稿; 2010 年 7 月 14 日收修定稿

第一作者: 杨军, 主要从事大气物理学与大气环境研究. Email: jyang@nuist.edu.cn

1961年4月挪威测得至今为止记录到的最大积冰量,每米电线上的冰重达305 kg,最大等效直径达1.4 m。1998年加拿大魁北克的冰灾,使900 km的输电线路遭到破坏,1000多基线塔倒塌,这次冰灾无论持续时间还是危害程度上都是史无前例的<sup>[2]</sup>。2008年1—2月中国也出现了历史罕见的冰冻天气,13个省电力系统运行受到影响,最严重地区电网近乎瘫痪<sup>[3-5]</sup>。除此之外,日本、美国、英国、冰岛、瑞士等地都曾发生过严重冰雪灾害。

为了能准确地对积冰事件进行理论分析和业务预报,近60多年来世界各国在广泛开展观测和实验研究的基础上,致力于电线积冰基础理论、数值模式和业务应用研究,特别是在积冰形成气象条件、气流的动力学、液滴运动轨迹以及热力学过程等方面取得了大量研究成果,并通过数值模式进行了积冰量和积冰持续时间的定量研究和预测。我国从20世纪50年代开始介绍国外有关电线积冰的研究成果,并开展了一些研究和服务工作,水电部西南电力设计院于1964年底在四川省会东县白龙山建立了第一个专门的电线积冰观测站,积累了我国最早的电线积冰观测资料<sup>[6]</sup>,随后对气象条件与积冰过程的关系进行了大量统计分析,同时也开展了一些物理过程和数值模拟研究工作<sup>[7-17]</sup>。

本文主要回顾电线积冰物理过程及数值模式的发展状况,并对可能的发展方向进行讨论。

## 1 定义和分类

雨淞、雾淞凝附在电线上或湿雪冻结在电线上的现象称之为电线积冰。电力、通讯部门称之为电线覆冰<sup>[8]</sup>。通常将电线积冰按形成过程分为两类<sup>[18]</sup>:

(1) 降水积冰。降水产生的积冰包括雨淞、湿雪和干雪引起的积冰,主要取决于近地面及地面上几百米大气的温度层结。当环境温度在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间时,过冷却雨滴或毛毛雨滴碰冻在温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 的物体上形成雨淞,呈透明玻璃状或半透明毛玻璃状,坚硬光滑,密度很大。干雪引起的积冰密度小,通常不超过 $0.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,对输电线路不会造成严重的影响。雪花下落经过近地面温度稍高于 $0^{\circ}\text{C}$ 的气层时,会部分融化形成湿雪。湿雪的粘附力大于干雪,形成的积冰密度较大,严重时可对输电线路造成一定危害。

(2) 云雾积冰。指处在过冷却状态下的云滴、雾滴碰到地面物体上发生冻结形成半透明毛玻璃状、密度较大的积冰<sup>[6,18]</sup>。Lock<sup>[19]</sup>认为雾淞多出现在山地或者稳定逆温层下形成的过冷却雾中。根据云雾中的液水含量、云雾滴谱分布、温度和风速的不同,可形成软雾淞或硬雾淞,前者密度小于后者。硬雾淞形成时的温度一般在 $-10\sim 1^{\circ}\text{C}$ 之间,软雾淞在 $-20\sim 1^{\circ}\text{C}$ 之间<sup>[8]</sup>。一般来说,液滴直径小、温度低,同时周围气温也较低,以致水滴冻结释放的潜热能较快传出,易形成雾淞;反之,则易形成雨淞。

根据积冰形成的微物理机制,电线积冰增长过程可分为干增长和湿增长。这种分类有助于分析电线积冰的形成机理及形成过程中的热平衡及热传递。雾淞和干雪积冰是干增长过程的产物,雨淞和湿雪积冰是湿增长过程的产物,而混合淞则是雨淞、雾淞交替增长的结果<sup>[8]</sup>。总的来说,积冰类型主要由空气温度、风速、水成物粒子的大小、液水含量和降雨强度等因素决定。

## 2 电线积冰物理机制

20世纪70年代以前,研究者们已开展了大量电线积冰的观测试验、室内实验和理论研究,为后来数值模式的发展奠定了最初的理论基础。当时主要考虑电线积冰是由于过冷却水滴随风运动,接触到地面物体释放潜热冻结而发生的物理现象,认为电线积冰的发生需满足3个条件,即:

(1) 大气中必须有足够的过冷却水滴,这取决于环境气象条件,Langmuir和Blodgett<sup>[20]</sup>(以下简称LB)、Imai<sup>[21]</sup>、Chaine等<sup>[22]</sup>先后建立了积冰量与常规气象要素之间的参数化关系,确定了影响电线积冰的主要气象参数有:空气温度、风速、风向、过冷却水滴直径、液水含量,这5个参数的不同组合决定了电线积冰类型。同时认为,风对电线积冰起着重要作用,它将大量过冷却水滴源源不断地带向输电线路,电线捕获的水滴增多使积冰过程加快。当具备了形成积冰的温度和水汽条件后,除了风速对积冰的影响外,风向也是决定电线积冰程度的重要参数,风向与电线平行时,积冰较轻;风向与电线垂直时,积冰比较严重<sup>[8,12]</sup>。

(2) 过冷却水滴被电线捕获,决定于水成物粒子的运动轨迹及其与电线的碰撞效率。1946年LB成功计算了液滴经过圆柱形物体时的运动轨迹,

Ludlam<sup>[23]</sup>在此基础上从微观角度定义了干增长和湿增长两种不同结冰类型,研究发现在给定的温度和风速条件下,干、湿增长过程的发生取决于环境液水含量的大小。对于湿增长过程,Fraser等<sup>[24]</sup>研究认为,在特定条件下,不是所有被捕获的未冻结水滴都会流失,其中一部分水分保留在其由辐枝状冰晶组成的网格或骨架内被保留起来,从而形成海绵状冰结构。

(3) 由结冰表面的热平衡方程决定的过冷却水滴冻结速率。Messinger<sup>[25]</sup>和List<sup>[26]</sup>分别基于能量守恒原理建立了冰表面热量平衡方程,考虑结冰过程中的热量交换与传递过程。

近 40 年来,人们进一步研究了水成物粒子与电线碰并的微物理过程、能量平衡过程以及由此决定的结冰性质,特别是对碰撞效率、黏性率、热量平衡和结冰密度有了更深入的认识。国际标准组织推荐电线结冰质量增长率的计算方法为<sup>[18]</sup>:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \omega AV \quad (1)$$

其中  $\alpha_1$  是碰撞效率,  $\alpha_2$  是黏性率,  $\alpha_3$  是冻结率,  $M$  是单位长度的冰重,  $\omega$  是单位体积液水含量,  $V$  是垂直于积冰表面的风速分量,  $A$  是积冰体的横截面积。

## 2.1 碰撞效率

当携带液滴的气流受到物体阻挡时,液滴的运动轨迹由空气黏性力和惯性力共同决定。如果惯性力很小,则黏性力就起主导作用,液滴就按空气的流线运动而绕过物体;对大滴来说,惯性力占主导作用,液滴与物体碰撞的可能性增大。这种能碰撞到物体的质量通量密度与空气中液滴的质量通量密度之比称为碰撞效率。早在 1946 年 LB<sup>[20]</sup>就提出了液滴的拖曳系数和雷诺数之间存在联系,并通过位势流运动方程计算了液滴轨迹和碰撞效率。之后,McComber等<sup>[27]</sup>又提出一个数值近似方法。但是,Finstad等<sup>[28]</sup>研究发现还是 LB 采用拉格朗日近似的方法更为精确,它能适用于大部分实际情况,但是当碰撞效率很低时, LB 高估了碰撞效率。由于碰撞效率是水滴运动轨迹的函数,分析求解比较复杂,刘和云等<sup>[13]</sup>利用量纲分析法导出碰撞效率的无因次准则方程式,得出碰撞效率与过冷却水滴运动的雷诺数和电线直径与过冷却水滴直径之比有关。而蒋兴良等<sup>[14]</sup>将计算分为两步,分别利用解析方法和数值分析方法计算液滴处于不同位置时的运动轨迹、

速度及与电线碰撞的切线,从而确定运动轨迹,求出碰撞效率。Fu<sup>[2]</sup>则在 2004 年采用容格-库塔算法计算液滴的运动轨迹。Aliaga等<sup>[29]</sup>的三维模式利用计算流体动力学方法来解决局部流场问题,并分别利用拉格朗日和欧拉算法计算局部碰撞效率,局部碰撞效率是指气流起始处两条轨迹之间的垂直距离与碰撞到冰表面时两点之间距离的比值。

出于应用的目的,部分研究者提出了一系列经验公式直接计算碰撞效率。Gates等<sup>[30]</sup>提出了两种近似方法:(1)假设结冰形状是简单的几何形状(如圆柱形),碰撞效率就可通过一个无量纲参数的函数得到;(2)假设结冰层沿着积冰体形状形成,则结冰形状会对气流、液滴轨迹、碰撞效率产生扰动,此时气流、液滴的动力性质可由绕流方程求得。同时期Makkonen<sup>[31]</sup>在 LB 理论上提出了通过液滴的中值体积直径计算总碰撞效率的经验公式。1998 年, Jones<sup>[32]</sup>假设液滴垂直方向上的速度等于下落末速度,水平方向上的速度等于风速,在忽略液滴大小的情况下改进了液滴运动轨迹的计算方法。

## 2.2 黏性率

黏性率表示在冻结前驻留在电线表面的过冷却水滴与碰撞到电线表面的所有过冷却水滴之比,云物理学中习惯称之为并合效率,通常分两种情况考虑:(1)过冷却水滴碰撞到干的冰表面时立即冻结,且没有溅散;(2)冰表面有水膜时,液滴可能沿着电线表面散开,不发生反弹现象。不过, List<sup>[33]</sup>、Choularton等<sup>[34]</sup>和 Dong等<sup>[35]</sup>指出小滴在碰撞过程中可能会出现反弹现象。但小滴对结冰质量的贡献很小,所以液滴的黏性率一般近似取 1。

然而,雪花的反弹现象不能忽略。对一个固态粒子来说,如干雪,黏性率近似为 0<sup>[36]</sup>。但是, Sakamoto<sup>[37]</sup>研究发现在风速小于  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,干雪也有可能粘附在电线上,随后雪体下滑形成下垂雪柱。一般情况下干雪产生的雪压远小于湿雪,这是因为:(1)在低风速条件下干雪粘附在电线上的雪通量很小,而且主要受风速的影响;(2)干雪的密度一般小于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,这样低的密度引起的附着力也很小,所以干雪引起的积冰很容易脱落,在高风速条件下,干雪引起的电线积冰不会造成严重的危害<sup>[18]</sup>。

湿雪的情形恰恰相反,在合适的温度、湿度和碰撞速度条件下,黏性率可等于 1。Admirat等<sup>[38]</sup>给出的风速与湿雪黏性率的关系为:

$$\alpha_2 = \begin{cases} v^{-1}, & v \geq 1 \\ 1, & v < 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中  $v$  为风速,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

Sakamoto 等<sup>[39]</sup>和 Poots<sup>[40]</sup>利用实验室模拟和外场观测结果认为,使用经验公式是估计湿雪黏性率的较好方法,并发现空气温度、湿度和降水强度影响湿雪的黏性率。Makkonen<sup>[41]</sup>指出当湿球温度低于  $0^\circ\text{C}$  时,就不利于湿雪积冰增长。

### 2.3 热量平衡与冻结

在热量平衡条件下,假设碰撞水滴、冰表面和外界环境之间的热量交换都是瞬时的,则局部冰表面温度可通过热量平衡方程确定。最早在 1951 年, Ludlam<sup>[23]</sup>分析了圆柱形物体冰表面热量交换的物理机制。Messinger<sup>[25]</sup>和 List<sup>[33]</sup>随后利用能量守恒原理明确提出了积冰体的热量平衡方程:

$$Q_c + Q_e + Q_v + Q_k + Q_w + Q_f = 0 \quad (3)$$

其中  $Q_c$  是积冰体与空气之间的对流热通量,  $Q_e$  是蒸发或升华潜热通量,  $Q_v$  是空气摩擦产生的热通量,  $Q_k$  是液滴碰撞冰面的动能加热通量,  $Q_w$  是碰撞积冰体的液滴温度降低到冻结温度释放的热通量,  $Q_f$  是冻结潜热通量。上式假设积冰是一个热量守恒的过程,所有的热量传输总和为 0。

干增长过程通常发生在液水含量低且温度较低条件下,过冷却水滴碰撞在物体表面立即开始冻结,利用热量平衡方程可预测干增长过程中的冰表面温度。湿增长过程大多发生在液水含量高和环境空气温度接近融化温度的条件下,水滴碰撞到电线后短时间内不能冻结而在电线表面形成一层水膜,过冷却水滴冻结释放的热量不能及时传出。在该过程中,热量平衡方程则用来预测被捕获得水滴的冻结率,即冻结水量与驻留在电线表面的总水量之比。自然积冰过程中常存在干、湿增长过程的交替进行, Makkonen<sup>[42]</sup>、孙才新等<sup>[15]</sup>都利用热平衡方程得到了积冰由湿增长向干增长转变的临界条件,以及干、湿增长条件下电线积冰过程与环境温度、风速、液滴直径、液水含量及电线传输电流等参量之间的关系。

Lozowski 等<sup>[43]</sup>给出了式(3)中各项的定量计算方法。Jones<sup>[32]</sup>则分析了不同温度、风速、降水量、相对湿度及太阳辐射条件下,式(3)中各项对积冰过程的影响程度,发现对流冷却、蒸发冷却和融化释放的潜热是最重要的因子。而对流和蒸发热通量都是对流传热系数的函数,对流传热系数可由努塞

数求得,电线积冰应用中通常将努塞数和雷诺数的关系表示为:

$$Nu = C_1 Re_d^{C_2} \quad (4)$$

其中,  $C_1$  和  $C_2$  是常数,其取值根据液滴的雷诺数  $Re_d$  的变化而变化。对于粗糙的圆柱体来说, Makkonen<sup>[44]</sup>, Achenbach<sup>[45]</sup>和 Grenie 等<sup>[46]</sup>都相继提出了平均努塞数的不同计算方法。

2004 年 Fu<sup>[2]</sup>指出热量平衡方程一直是积冰物理的重要理论基础,一些研究者在应用过程中进行了稍微的改动或修正,例如增加了传输电流、电场强度的影响。观测及实验表明,电场强度较小时积冰量随电场强度的增大而增加,当电场强度足够大时积冰量则随电场强度增大而减少<sup>[8]</sup>。

### 2.4 积冰密度

积冰密度的大小影响着积冰厚度和形状的预测,随着积冰条件的变化,积冰密度在小于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  到接近于水的密度之间变化,相应预测的积冰厚度变化范围也很大。不同积冰类型中,雨淞表面光滑透明,密度最大,一般大于  $0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。对于雾淞,积冰密度可通过冰表面的温度求得。湿增长过程中,冰表面温度为零,密度可高达  $0.917 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;干增长过程中,冰表面温度小于零,相应的密度变化范围较大,一般在  $0.2 \sim 0.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  之间。

早期常采用由实验数据拟合得到的经验公式计算积冰密度。1962 年 Macklin<sup>[47]</sup>定义了计算积冰密度的参数:

$$R = V_0 d_m / (2t_s) \quad (5)$$

其中  $V_0$  是液滴碰撞速度,  $d_m$  是液滴的中值体积直径,  $t_s$  是积冰表面温度。随后的研究中一般把积冰密度归结为  $R$  的函数,并将  $R$  称为 Macklin 参数。Bain 等<sup>[48]</sup>, Makkonen 等<sup>[49]</sup>和 Jones<sup>[50]</sup>都分别在 Macklin 参数的基础上,提出了不同的积冰密度关于  $R$  的参数化方案, Fu<sup>[2]</sup>比较了包括原始的 Macklin 方案在内共 4 种积冰密度的算法,发现 Makkonen 得出的积冰密度在整个 Macklin 参数范围内都高估了积冰密度, Bain 方案在  $R$  较小时得到的积冰密度最低,而 Jones 方案在  $R$  较大时得出的积冰密度最低,在 Fu 的二维模式中采用了 Bain 的参数化方案。

目前对于湿雪引起的电线积冰,定量估算积冰密度还不成熟, Sakamoto 等<sup>[51]</sup>根据经验结果认为

湿雪积冰密度主要与环境温度有关;1993 年 Sakamoto 等<sup>[39]</sup>又提出湿雪积冰密度也与风速有关。显然,局地气象条件对湿雪积冰密度的影响起着重要作用。在实际应用中,尽管不同自然条件下湿雪积冰密度变化很大,多数时候还只是简单地将湿雪积冰密度设为常数,如  $0.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>[52]</sup>。

### 3 积冰数值模拟

电线积冰的直接观测往往受到气象条件、地形的限制,同时还缺乏不同承载能力电线的积冰观测规范标准,一定程度上影响了观测资料的代表性和准确性,给业务应用带来不便。在观测试验和理论研究基础上发展起来的数值模拟方法主要有两方面优势:(1)尽管已有的电线积冰资料在某一局部区域和时段具有较高的时、空分辨率,但长序列的气象资料则具有更广泛的区域代表性和严格的规范标准,可以作为高分辨率积冰模式的环境条件,从而模拟得到详细的区域积冰状况;(2)基于详细物理过程的数值模式系统可以弥补早期经验方法的缺陷<sup>[18]</sup>,特别是电力设计、防灾减灾等应用领域更加关注极端积冰情况,但往往不一定能够通过直接观测得到。

#### 3.1 积冰过程模拟

20 世纪 70 年代开始,研究者们开始利用计算机来模拟积冰过程。1974 年 Chaine 等<sup>[22]</sup>建立了雨淞模式,首先通过风速、温度和降水率计算积冰体的水平和垂直厚度,然后由水平和垂直厚度得到等效积冰半径。1984 年 Makkonen 等<sup>[49]</sup>指出积冰体尺寸和形状的改变可以影响到碰撞效率和冻结率,甚至在气象条件不变的情况下也可使积冰从干增长向湿增长过程转变,这使积冰过程变得很复杂,对当时的数值模拟是一个挑战。为了简化这一过程,Makkonen 假设积冰体维持为圆柱形,黄万岗<sup>[17]</sup>利用 Makkonen 模式对贵州的输电线积冰进行了模拟研究。1998 年 Jones<sup>[32]</sup>建立一个简单的雨淞模型,对一些积冰物理过程进行了简化,冰重的计算建立在降水率和风速的基础上,模拟结果与 Makkonen 模式相差不大。

对于积雪型积冰的模拟,Sakamoto 等<sup>[51]</sup>在 1984 年建立了半经验积雪型积冰模式,假设积雪引起的积冰由降水率、雪粒子末速度、风速、空气温度以及雪的平均密度决定,模式中还考虑了雪的融化、

脱离等问题。Skelton 等<sup>[53-54]</sup>在 20 世纪 90 年代初建立了三维雾凇和湿雪模式计算积冰体的水当量,模式中包含了雾凇向雨淞转变的热力过程,湿雪引起的积冰重量利用气象资料确定。

近年来发展的积冰数值模式对物理过程的表征越来越详细。如对积冰形状的模拟,从一开始假设积冰形状为圆柱形到椭圆形,发展到在模式中加入气流动力学方程和液滴轨迹的显式计算方案,能够模拟出不规则积冰形状的变化。其中,对流传热系数是湿增长条件下决定积冰形状的重要参数, $Fu$ <sup>[2]</sup>的二维模式中利用边界元法计算位势流,并与积分边界层模式耦合,确定积冰表面之上的对流传热分布。目前,部分积冰数值模式已发展为三维模式,如 Aliaga 等<sup>[29]</sup>针对不稳定条件,应用计算流体力学方法解决局部流场问题,将气流和液滴的轨迹结合到了三维积冰模式中。而 Szilder 等<sup>[55]</sup>在三维模式中则利用纳维-斯托克斯方程来解决热量传递和局部流场问题。

#### 3.2 垂冰模式

湿增长过程中有一部分水滴未冻结,未冻结的液态水会因为重力和风的作用而流失,重力引起的流失会导致垂冰的形成。Makkonen<sup>[56]</sup>将垂冰模式加入到冻雨积冰模式中,指出当空气温度高到适合垂冰增长时,产生的总积冰量比其他任何温度下都大,因为垂冰自身也捕获液滴,这一效应在高风速条件下显得尤为重要。

当垂冰增长时,积冰表面冻结释放的潜热由冰水界面传输出去,热量损耗的方向由冰水界面向外,冻结潜热的释放控制着积冰增长率。热对流和蒸发主要导致热量由垂冰外表面向空气中传输,积冰体向外发射辐射引起的热量损失和垂冰内部的传热可以忽略。在此理论上,Makkonen<sup>[57]</sup>研究表明垂冰长度的增长率随液水供应的增加而减小,这是因为大量液滴短时间内被冰柱捕获后来不及冻结而流失造成的。然而,液水的增加对垂冰宽度影响较小,这是因为对流传热系数随着垂冰直径的增大而减小。Maeno 等<sup>[58]</sup>于 1994 年在实验室成功地验证了这一规律。

每米电线上垂冰的个数是决定积冰量的一个重要参数。不仅仅是因为垂冰数决定了总的冰重,而且垂冰的空间尺寸决定了有多少液水可以流入到垂冰的底部。Makkonen 等<sup>[59]</sup>通过数值模拟解决了垂

冰的空间距离问题,随后 De Bruyn<sup>[60]</sup>通过实验验证了他们的结果,表明不管增长条件如何,垂冰之间的空隙仅稍大于 2 cm。

除了 Makkonen 提出的垂冰模式外, Szilder 等<sup>[61]</sup>提出一个简单的解析模式,并在 1995 年发展为三维垂冰模式<sup>[55]</sup>。这个模式中将沿着垂冰表面流动的水流分成多个流体元,这些流体元随机选择路径流向垂冰的底部,单个流体元的冻结率通过流体元运动过程中的实时状态确定。Szilder 模式不限制被冻结物的形状,引起了众多学者的关注。

### 3.3 形态模式

1992 年 Szilder<sup>[62]</sup>提出形态模式不仅能预测诸如密度等积冰特性,而且能处理离散的冰结构,如雾凇的羽毛状和冰柱。积冰形态模式能够反映冰形成的细微物理过程,起源于时空离散的局部动力学模型和流体动力学的离散粒子法。

形态模式本质上是通过不连续的粒子建立积冰过程,根据粒子大小,既可把不连续粒子作为个体处理,又可将它们看成一个整体。初始条件的建立是通过确定单个粒子的碰撞位置,类似经典物理模型中通过求解拉格朗日方程确定粒子轨迹,以及用参数化方案决定局部碰撞效率的分布。一旦粒子发生碰撞,它就开始随机的离散。因为冰表面液体流很小,它的流体动力由准动力过程决定,包括地球引力、黏性力、表面张力和风压力,所以每个粒子都在特定的条件下运动。形态模式通过蒙特卡罗近似将这些过程结合起来,蒙特卡罗方法采用类似分子动力学仿真手段对每个粒子的随机变动进行模拟,通过对随机变动的控制可得出与受力平衡有关的运动概率。如果粒子满足形成冰柱的条件,就可能离开其依附的表面,从而模拟出冰柱的形成过程。

然而,形态模式还没能够完全解决好与积冰过程有关的物理数学方程、初始条件和边界条件,已有的许多形态模式都暂时回避了这些问题<sup>[63-64]</sup>。

## 4 研究展望

近 10 年来,电线积冰理论和数值模式得到了全面发展,已能够较为准确地再现和预报积冰宏观物理过程,但在以下方面还有待进行更为深入的研究:

(1) 外场观测试验。观测事实是理论和模式发

展的基础,随着仪器设备和观测技术的发展,积冰过程和气象状况的观测内容不断丰富,精度不断提高。例如,高时间分辨率的积冰要素、云雾降水粒子尺度谱分布及落速、局地微气象参数等均已能实现在线观测。开展经过精心设计的外场观测试验有助于进一步深入揭示电线积冰物理机制,为数值模式改进提供理论基础。同时,包含详细、复杂物理过程的数值模式的性能也是常规观测资料无法充分验证的,需要开展具有针对性的、同时包含宏微观物理参数的观测试验支持。此外,地面气象观测针对通讯线路保障积累了大量历史积冰观测资料,如何将其应用到电力系统保障,以及针对输电线路安全如何进行积冰观测方案改进等问题也需要解决。

(2) 积冰物理机制。(a) 碰撞效率直接决定于云雾降水粒子的尺度,目前常用的碰撞效率经验公式是在缺少粒子尺度谱分布条件下获得的,在低碰撞效率时偏低,对较大积冰体和长时间积冰会产生严重偏差。此外,当积冰体形状不规则时(如绝缘子),电线周围的局部流场复杂,液滴轨迹与积冰表面的角度差异很大,其对碰撞效率的影响也有待确定。(b) 湿雪的黏性率通常根据风速确定,甚至在一些物理过程较为全面的数值模式中也是如此。但是,温度、湿度、雪粒子谱分布及由此决定的降雪强度等因素在很大程度上制约着黏性率的大小,下落雪花的热平衡处理方法有助于该问题的解决。同时,在一定相对速度和粒子尺度条件下,过冷却水滴和雪花与电线碰撞时可能发生破碎现象,其对黏性率的影响需要进一步讨论。(c) 虽然雨凇的形成理论比较成熟,但缺少复杂积冰表面粗糙度方面的研究,造成热传递过程定量计算的困难。对此需要在研究中加强积冰热力学与微动力学的有机结合。

(3) 积冰微气象条件。利用理论模式预测积冰量时存在的最主要问题之一,是缺乏准确的积冰微气象条件。如过冷却液滴中值体积直径和液水含量对雨凇模拟影响较小,但是严重影响雾凇发展过程,这两者及更为基本的粒子尺度谱分布均不属于常规观测内容。又如对积冰过程开始、结束的确定需要借助准确的气温和云高等常规资料,但在一些地形复杂的偏远地区获取这些数据还相当困难。此外,可靠的风速资料也不易获取,积冰时常严重影响测风仪器的性能,极端情况下可将测风传感器完全冻结。积冰理论模型基本上都依赖于这些数据的准确性和完整性,除了进行测量仪器设备改进、更多地开

展典型积冰区外场观测试验之外,通过精细化气象模式结果获得积冰微气象条件也是一种可行方法。

(4) 积冰数值模拟。电线积冰现象是多尺度物理过程耦合的结果,客观上要求不同尺度的气象模式与积冰模式有机结合,从而得到较为准确的积冰过程预报,为线路的合理设计、防灾减灾决策、减轻积冰灾害影响,指导防冰、除冰等现实需求提供理论和数据支持。目前将高分辨降水模式与积冰模式的耦合已成为一种趋势,但还需要提高模式对云雾降水粒子谱分布、含水量和冻雨发生条件预测的准确性。另外,形态模式还处于起步阶段,为了建立能够反映自然过程的积冰形态演变控制方程,严密的支撑理论还需要进一步发展。

## 参考文献

- [1] 贵州省气象局. 2008年贵州特大凝冻灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 242.
- [2] Fu P. Modeling and simulation of the ice accretion process on fixed or rotating cylindrical object by the boundary element method [D]. Chicoutimi: Université du Québec à Chicoutimi, 2004: 182.
- [3] 王凌, 高歌, 张强, 等. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 I. 气候特征与影响评估[J]. 气象, 2008, 34(4): 95-100.
- [4] 吴向东, 张国威. 冰雪灾害对电网的影响及防范措施[J]. 中国电力, 2008, 41(12): 14-18.
- [5] 赵珊珊, 高歌, 张强, 等. 中国冰冻天气的气候特征[J]. 气象, 2010, 36(3): 34-38.
- [6] 谭冠日. 近年来关于电线积冰的一些研究[J]. 气象, 1983, 9(10): 25-26.
- [7] 顾骏强, 朱持则, 姜瑜君, 等. 探空资料在输电线路覆冰事故评估中的应用[J]. 气象, 2010, 36(8): 81-86.
- [8] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 24-29.
- [9] 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究[J]. 科学通报, 1983, 28(15): 928-931.
- [10] 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 91-95.
- [11] 王守礼. 影响电线覆冰因素的研究与分析[J]. 电网技术, 1994, 18(4): 18-24.
- [12] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨[J]. 气象学报, 1982, 40(1): 13-23.
- [13] 刘和云, 付俊萍, 周迪, 等. 导线覆冰时收集系数的量纲分析[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(10): 76-77.
- [14] 蒋兴良, 张丽华. 导线覆冰碰冻率及最大覆冰直径分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 10-13.
- [15] 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[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 141-145.
- [16] 谢运华. 导线覆冰密度的研究[J]. 中国电力, 1998, 31(1): 46-51.
- [17] 黄万岗. 贵州输电线积冰数值研究[J]. 贵州气象, 1994, 18(6): 26-30.
- [18] Makkonen L, Lozowski E P. Numerical modeling of icing on power network equipment[M]// Atmospheric Icing of Power Networks. New York: Springer, 2008: 83-117.
- [19] Lock G S H. The growth and decay of ice [M]. New York: Cambridge University Press, 1990: 434.
- [20] Langmuir I, Blodgett K B. A mathematical investigation of water droplet trajectories [R]. Washington, D. C.: Army Air Forces Headquarters, 1946: 65.
- [21] Imai I. Studies on ice accretion[J]. Research on Snow and Ice, 1953, 3(1): 34-44.
- [22] Chaine P M, Castonguay G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors [M]. Toronto: Environment Canada, 1974: 11.
- [23] Ludlam F H. The heat economy of a rimed cylinder [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1951, 77(334): 663-666.
- [24] Fraser D, Rush C K, Baxter D. Thermodynamic limitations of ice accretion instruments [R]. Ottawa: National Aeronautical Establishment, 1952: 12.
- [25] Messinger B L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed [J]. J Aeronaut Sci, 1953, 20(1): 29-42.
- [26] List R. General heat and mass exchange of spherical hailstones [J]. J Atmos Sci, 1963, 20(3): 189-197.
- [27] McComber P, Touzot G. Calculation of the impingement of cloud droplets on a cylinder by the finite-element method [J]. J Atmos Sci, 1981, 38(5): 1027-1036.
- [28] Finstad K J, Lozowski E P, Gates E M. A computational investigation of water droplet trajectories [J]. J Atmos Ocean Technol, 1988, 5(1): 160-170.
- [29] Aliaga C N, Aube M S, Baruzzi G S, et al. A third-generation in-flight icing code: FENSAP-ICE-Unsteady [C]. SAE 2007 Aircraft & Engine Icing International Conference, Seville, 2007: 3339.
- [30] Gates E M, Lozowski E P, Finstad K J. An approximate method for time-dependent modelling of rime ice accretion [C]. Proceedings of the 2nd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 1984: 111.
- [31] Makkonen L. Heat transfer and icing of a rough cylinder [J]. Cold Regions Sci Technol, 1984, 10(2): 105-116.
- [32] Jones K F. A simple model for freezing rain ice loads [J]. Atmos Res, 1998, 46(1-2): 87-97.
- [33] List R. Ice accretion on structures [J]. J Glaciol, 1977, 19(81): 451-465.
- [34] Choularton T W, Griggs D J, Humood B Y, et al. Laboratory studies of riming, and its relation to ice splinter production [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1980, 106(448): 367-374.
- [35] Dong Y Y, Hallett J. Droplet accretion during rime growth

- and the formation of secondary ice crystals [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1989, 115(485): 127-142.
- [36] Wakahama G, Kuroiwa D, Goto D. Snow accretion on electric wires and its prevention [J]. *J Glaciol*, 1977, 19(81): 479-487.
- [37] Sakamoto Y. Snow accretion on overhead wires [J]. *Phil Trans Roy Soc*, 2000, 358(1776): 2941-2970.
- [38] Admirat P, Sakamoto Y. Wet snow on overhead lines: State-of-art [C]. *Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. 1988: 8-13.
- [39] Sakamoto Y, Miura A. Comparative study of wet snow models for estimating snow load on power lines based on general meteorological parameters [C]. *Proceedings of the 6th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. 1993: 133-138.
- [40] Poots G. Ice and snow accretion on structures [M]. Taunton; Research Studies Press, 1996: 338.
- [41] Makkonen L. Estimation of wet snow accretion on structures [J]. *Cold Regions Sci Technol*, 1989, 17(1): 83-88.
- [42] Makkonen L. Estimating intensity of atmospheric ice accretion on stationary structures [J]. *J Appl Meteor*, 1981, 20(5): 595-600.
- [43] Lozowski E P, Stallabrass J R, Hearty P F. The icing of an unheated, non-rotating cylinder. Part I: A simulation model [J]. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22(2): 2053-2062.
- [44] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires [J]. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23(6): 929-939.
- [45] Åchenbach E. Heat transfer from smooth and rough surfaced circular cylinders in a cross flow [C]. *Proceedings of the 5th International Heat Transfer Conference, Tokyo*, 1974: 229-233.
- [46] Grenier J C, Admirat P, Maccagnan M. Theoretical study of the heat balance during the growth of wet snow sleeves on electrical conductor [C]. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. 1986.
- [47] Macklin W C. The density and structure of ice formed by accretion [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1962, 88(375): 30-50.
- [48] Bain M, Gayet J F. Contribution to the modeling of the ice accretion process: Ice density variation with the impacted surface angle [J]. *Ann Glaciol*, 1983, 4: 19-23.
- [49] Makkonen L, Stallabrass J R. Ice Accretion on Cylinders and Wires [R]. Ottawa; National Research Council of Canada, Report TR-LT-005, 1984.
- [50] Jones K F. The Density of natural ice accretions [C]. *Fourth international conference on atmospheric icing of Structures*, 1988, 77: 114-118.
- [51] Sakamoto Y, Ishihara K. An estimating method of snow load on overhead power lines [C]. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. 1984: 137-140.
- [52] Koshenko A M, Bashirova L. Recommendations on forecasting the precipitation and deposition (sticking) of wet snow [J]. *Trudy UkrNIGMI*. 1979, 176: 96-102.
- [53] Skelton P L I, Poots G. A dynamical model of rime-ice accretion on an overhead transmission line of finite torsional stiffness [J]. *Math Eng Ind*, 1990, 3(1): 1-24.
- [54] Skelton P L I, Poots G. Snow accretion on overhead line conductors of finite torsional stiffness [J]. *Cold Regions Sci Technol*, 1991, 19(3): 301-316.
- [55] Szilder K, Lozowski E P. Simulation of icicle growth using a three-dimensional random walk model [J]. *Atmos Res*, 1995, 36(3-4): 243-249.
- [56] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation [J]. *Atmos Res*, 1998, 46(1-2): 131-142.
- [57] Makkonen L. A model of icicle growth [J]. *J Glaciol*, 1998, 34(116): 64-70.
- [58] Maeno N, Makkonen L, Nishimura K, et al. Growth rate of icicles [J]. *J Glaciol*, 1994, 40(135): 319-326.
- [59] Makkonen L, Fujii Y. Spacing of icicles [J]. *Cold Regions Sci Technol*, 1993, 21(3): 317-322.
- [60] De Bruyn J R. On the formation of periodic arrays of icicles [J]. *Cold Regions Sci Technol*, 1997, 25(3): 225-229.
- [61] Szilder K, Lozowski E P. An analytical model of icicle growth [J]. *Ann Glaciol*, 1994, 19: 141-145.
- [62] Szilder K. Simulation of ice accretion on a cylinder due to freezing rain [J]. *J Glaciol*, 1992, 40(116): 180-184.
- [63] Rudzinski W J, Farzaneh M, Lozowski E P. Full-scale 3D numerical and laboratory simulations of glaze ice accretion on a non-energized station post insulator [C]. *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, 2005.
- [64] Lebatto E, Farzaneh M, Lozowski E P. Three-dimensional morphogenetic model of ice accretion on a non-rotating cylinder [C]. *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, 2005.