

DOI:10.11918/202402006

低温静止与运动表面结冰特性预测技术研究进展

余思锐¹, 宋孟杰^{1,2}, 沈俊¹, 孙小琴³, 王海东⁴, 高润森¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 汉阳大学 机械工程学院, 首尔 04763;
3. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410004; 4. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

摘要: 结冰是一种常见的自然现象, 在工业生产流程中也广泛存在, 且往往对生活生产造成不利影响。有效运用结冰特性预测技术, 可显著降低甚至杜绝各行业因结冰导致的潜在危害。既有研究表明, 使用结冰特性预测技术后路面交通事故率可降低65%, 若进一步结合除冰系统, 能在80%的结冰场景下实现表面高效防除冰。为有效规避各行业冰灾问题, 分别基于道路、输电线两类静止表面与风机叶片、飞机两类运动表面的既有结冰特性预测技术进行了综述与分析, 结果表明, 对于静止表面, 既有技术对结冰厚度等指标的预测精度可达80%以上, 运动表面则可达70%以上。既有结冰特性预测技术依原理差异可分为模型驱动法与数据驱动法两种, 其中数据驱动法具有很大发展潜力。基于归纳总结的应用于静止与运动两种状态下4种简单冷表面的结冰预测技术, 进一步提出该领域的重点研究方向, 以期为各类工程场景中低温表面的防除冰技术开发与优化提供参考借鉴。

关键词: 结冰特性预测; 道路表面; 风机叶片; 输电线; 飞机表面; 模型驱动; 数据驱动

中图分类号: U492.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2024)10-0150-19

Research progress on icing characteristic prediction technologies for low temperature stationary and moving surfaces

YU Sirui¹, SONG Mengjie^{1,2}, SHEN Jun¹, SUN Xiaoqin³, WANG Haidong⁴, GAO Runmiao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea;

3. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

4. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As a common natural phenomenon, icing is widespread in industrial production processes and often causes adverse effects on daily life and production. The potential hazards caused by icing in various industries could be significantly reduced or even eliminated by using ice characteristics prediction technologies. Previous studies have shown that the rate of road traffic accidents can be reduced by 65% after using ice characteristic prediction technology. Furthermore, when combined with the de-icing system, 80% of icing scenarios can be anti-icing or de-icing. To effectively address the issue of ice disasters across various industries, this review provides an overview and analysis of existing icing prediction technologies based on stationary surfaces such as road and transmission line, as well as moving surfaces such as wind turbine blade and aircraft. The results indicate that existing technologies achieve prediction accuracies of over 80% for indicators such as ice thickness on stationary surfaces and over 70% for moving surfaces. Existing ice characteristic prediction technologies can be divided into two types, model-driven method and data-driven method, with the later showing significant potential for development. Based on the summarized ice prediction technologies applied to four simple cold surfaces under stationary and moving states, this paper further proposes key research directions in this field, aiming to provide reference and guidance for the development and optimization of anti-icing technologies on low-temperature surfaces in various engineering scenarios.

Keywords: ice characteristic prediction; road surface; wind turbine blade; transmission line; aircraft surface; model-driven; data-driven

收稿日期: 2024-02-06; 录用日期: 2024-04-10; 网络首发日期: 2024-06-17

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240614.1327.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52076013); 北京市自然科学基金(3212024); 2023年度中韩青年科学家交流计划, the Government of the Republic of Korea (Ministry of Science and ICT), and the National Research Foundation of Korea in 2023

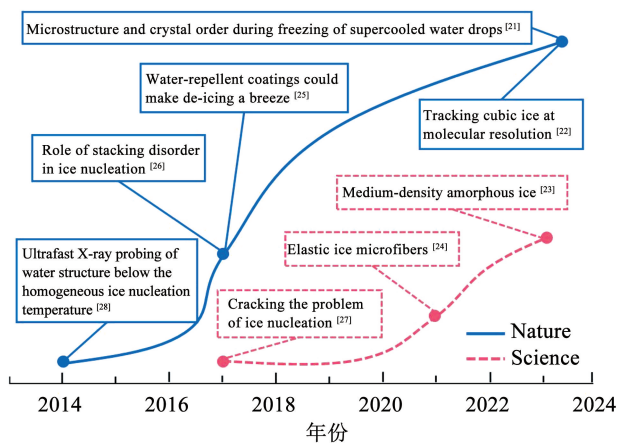
作者简介: 余思锐(2002—), 女, 硕士研究生; 宋孟杰(1984—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 宋孟杰, mengjie.song@bit.edu.cn

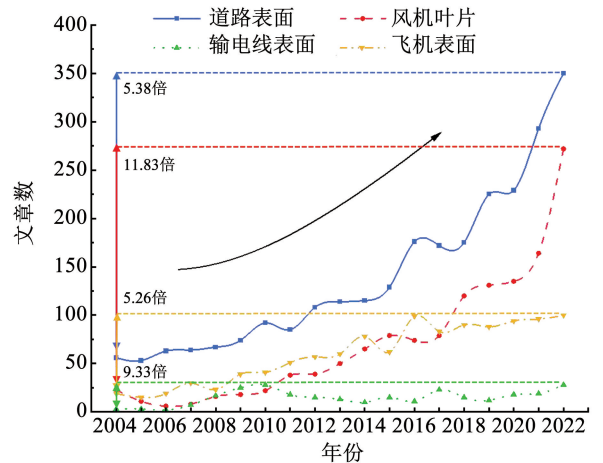
结冰在自然界与工业界广泛存在,且往往对生产和生活造成负面影响^[1-4]。为了应对结冰这一挑战性难题,尽可能地减小其带来的负面影响,研究人员自 20 世纪起便已开展对结冰情况的观测与研究^[5]。防除冰技术作为应对已经发生的结冰问题的有效手段,能够直接提供解决结冰问题的措施。多年来,防除冰技术一直备受关注,如机械除冰^[6]、热力除冰^[7]、表面涂层^[8]、液流融冰^[9]等方法相继涌现。通过表面防除冰处理与系统耦合优化控制,可实现一定程度的冰灾控制,但因结冰预测处于防冰除冰操作之前,可通过提前采取必要措施而有效减少甚至消除冰灾。此外,相比各类防除冰技术,结冰预测装置往往具有结构简单、易安装、占用空间少、经济成本低、能耗低等诸多优点,故结冰机制研究及结冰预测技术逐渐获得广泛关注。如图 1(a)所示,2014—2023 年持续有多篇结冰相关文章刊登在 Nature 与 Science 两个顶级刊物上,研究趋势越来越聚焦于冰晶成核机制探索及复杂条件下的冰晶微观结构分析。图 1(b)罗列了 2004—2022 年国内外围绕道路、风机叶片、输电线和飞机 4 种交通运输和能源领域典型低温表面结冰问题研究发表的文章数量,该数据随时间快速增长的趋势也说明结冰已逐渐成为热点研究问题。鉴于结冰在交通运输、能源电力、航空航天、食品冷藏等领域普遍存在,结冰预测技术作为一项重要的应用技术意义重大。

在交通运输方面,结冰会降低道路的通行能力,

导致交通事故发生率提高数十倍以上^[10],对交通运输和经济活动产生负面影响^[11-12]。例如 2023 年,北美冰暴导致美国产生大范围路面结冰积雪,多条州际路线关闭,公路不断产生严重交通事故。对路面结冰情况进行准确预测和监测,能够便于交通管理部门及时采取相应的除冰措施,并通过主动调度为道路使用者提供必要的安全出行指导。在能源电力领域,结冰导致风力发电机、太阳能电池板和输电线路等能源设施减产或故障^[13-14],甚至对整个能源系统带来巨大破坏,造成大幅经济损失或人员伤亡^[15]。例如 2008 年,中国南方因输电线路结冰导致大面积能源系统灾害,间接造成超过 1 100 亿元的高额经济损失。如采用结冰预测,能源公司和相关部门可提前采取措施,确保能源供应的稳定性和可靠性^[16-17]。在航空航天领域,结冰一方面会干扰飞行器的导航和通信系统,影响飞行器的安全运行;另一方面会对飞行器的发动机、传感器等关键器件与设备造成负面影响^[18],危及飞机安全^[19-20]。例如 2018 年,伊朗阿塞曼航空 EP3704 航班因飞机机身结冰而失速撞山,66 名乘机人员全部罹难。很明显,结冰预测技术有助于优化飞行决策,减少飞行器在结冰条件下运行的风险,从而保障飞行安全。为了总结和梳理既有结冰预测技术的研究进展与发展趋势,分别选取了道路和输电线两种静止表面、风机叶片和飞机两种运动表面,对既有结冰预测技术进行了分析与介绍。



(a) 2014—2023 年 Natme 和 Science 上刊登的结冰相关文章



(b) 2004—2022 年国内外结冰问题相关研究的文章总数

图 1 结冰相关的顶刊文章及国内外结冰研究的文章数量

Fig. 1 Articles from top journals related to icing and total number of articles on icing at home and abroad

1 结冰预测技术介绍

1.1 结冰机制

结冰是一个复杂的相变过程,涉及传热传质、流

体运动、界面科学等多个基础领域。结冰过程的本质是单粒液滴的凝固,因此,研究液滴的凝固过程有助于探究结冰机制,从而促进结冰预探测技术以及防冰控冰等技术的发展。如图 2(a)所示,已有研

究^[28-30]将静置冷板表面的单粒液滴冻结过程分为液体过冷、复辉、冻结和固体冷却/温降 4 个阶段。在液体过冷阶段,液滴温度受接触冷板的影响而不断下降至相变温度 T_1 以下,内部仍保持液态,液滴处于过冷状态。当液滴温度降至成核温度 T_3 ,液滴进入成核复辉阶段,内部形成均匀的冰水混合物,并且温度在释放潜热的作用下回升至 T_1 。此阶段持续时间很短,且成核是液滴结冰过程的起点。在此之后,液滴的冻结锋面在温度 T_1 下逐渐向液滴顶端生长,最终在顶端形成一个尖状凸起,这标志着冻结阶段的结束,此时,液滴温度降至冻结完成温度 T_2 。液滴从 T_1 降至 T_2 的时间与测温热电偶在液滴内部的高度和液滴高度之间的比值相关。完成冻结过程之后,冻结液滴的温度继续下降直至与平板温度一致,此为最后的固体冷却过程。对于结冰机制的研究主要集中在成核复辉阶段和冻结阶段。

图 2(b) ~ (e) 展示了单粒液滴在平面、曲面、竖直平板和风力影响下的结冰过程示意^[31-33]。其中,图 2(b) 和图 2(c) 可视为道路表面和输电线表面结冰过程的基本简化。图 2(d) 和图 2(e) 展示了非对称条件下的液滴冻结过程,包括竖直状态下重力的影响以及水平状态风力的影响,可见非对称条件下液滴形貌、冻结锋面等都会发生更复杂的变化。风机叶片和飞机表面等运动表面的结冰过程则涉及过冷水滴的碰撞结冰,是水滴碰撞与相变结冰相耦合的过程。当过冷水滴与表面碰撞时,首先会经历碰撞铺展阶段,水滴与表面迅速接触,并发生形状改变。接着水滴回缩,并在表面张力的作用下发生冻结,冻结的速率与形成冰层的厚度与过冷水滴温度、撞击速度、壁面性质等一系列影响因素有关^[30]。目前,对于过冷水滴碰撞结冰的机制性分析较少,研究主要集中在实验与数值模拟方面。

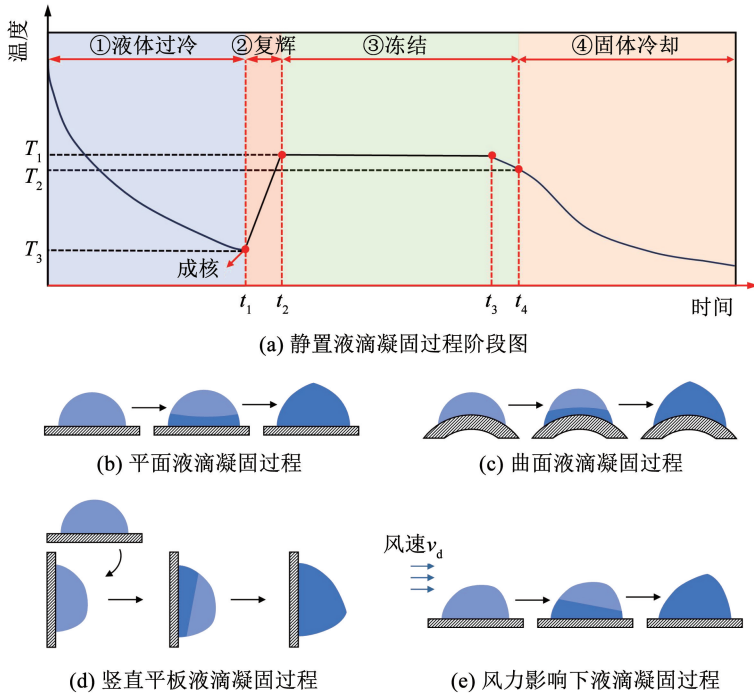


图 2 水滴凝固过程阶段划分及不同环境下凝固过程示意

Fig. 2 Stage diagram of a single droplet and schematic diagram of solidification process under different environments

宏观的结冰现象是单粒液滴凝固的累积,但其情况更复杂,包含液滴之间相互作用等影响,而并非简单的物理积累。目前,对于液滴间作用机制的研究还需进一步完善,但现有研究已经关注到液滴间的冰桥传播^[34-35]、合并弹跳^[36]等现象。冰桥对液滴冻结有显著影响,它使得单粒液滴的冻结能传播至整个表面。当某单粒液滴冻结时,其产生的潜热通过壁面传递,并与局部蒸汽压力梯度共同作用于邻近的液滴,从而导致邻近液滴的蒸发和凝固。如果冰桥在液滴完全蒸发之前与其接触,液滴就会实

现瞬时冻结,带来的连锁反应就能持续传播霜波^[34]。液滴的合并是广泛发生于各种表面上的液滴行为,弹跳行为则只发生在超疏水表面。弹跳现象的动能转化自液滴合并时释放的表面能。与液滴弹跳行为类似,液滴扫掠是更大尺寸的合并液滴自行向表面内部推动^[37],这两种液滴行为对结冰现象都具有一定的影响。除液滴间相互作用的影响外,道路等静止表面还会出现水膜结冰现象^[38]。高度、粗糙度的不均匀性会使得整个表面产生不同程度的积水或者潮湿,从而形成水膜。随着温度的降低,水

膜边缘会产生薄冰层,而后冰层随着时间向水膜中间推进,直至整个表面完全结冰,这就是水膜结冰现象。水膜结冰涉及较大面积连续介质多区域的同时相变,与水滴结冰相比,水膜的厚度、流动性、分布状态等因素都会对水膜结冰产生影响。

1.2 结冰特性预测技术

结冰预测技术是一项具有广阔发展前景的应用技术,它通过气象数据与人工智能算法、结冰传感器等软件与硬件的耦合,实现对结冰现象的超前预测与动态监测。其中,结冰传感器作为关键组件,能够实时监测并记录结冰过程的各种动态参数变化,如温度、湿度、压力等,为预测模型提供准确的实时数据,从而确保预测结果的准确性和可靠性。通过查

询谷歌专利数据库可知,2019 年中国公开结冰预测技术领域的发明专利共有 51 项,约占全国公开发明专利的 0.11%,2023 年公开的专利数量上升至 163 项,占全国公开专利的 0.18%,明显的上升趋势体现了结冰预测技术应用的良好发展前景。表 1 选取了 2019—2023 年部分关于道路、输电线、风机叶片和飞机 4 种表面的结冰预测专利成果,并按照时间排序进行展示。可以看出,约七成的结冰预测专利都结合智能算法或(与)系统集成。这说明随着计算机技术、人工智能等技术的发展,结冰预测技术更倾向于采用更高级的数据分析和模型,也更注重多源数据的整合以及决策支持和反馈系统的集成。

表 1 4 类表面的部分结冰预测专利汇总(2019—2023)

Tab. 1 Partial icing prediction patent summary of four types of surfaces (2019—2023)

序号	公开日期	发明人	专利名称	专利号	应用表面	专利内容
1	2019-01-29	陈斌 ^[39]	一种机场道面积冰预警系统及其预警方法	201710414813.9	道路表面	利用温度、积雪预测模型根据机场的环境与气象条件对现场道面结冰情况进行概率性预测,并进行预警
2	2019-03-12	王馨 ^[40]	一种输电线覆冰概率预测方法	201811348695.7	输电线表面	依据输电线覆冰事故资料及事故点邻近站的微气象站数据,建立了预测模型并对指标进行量化,从而进行概率预测与风险等级划分
3	2019-06-18	杜雁霞 ^[41]	一种飞机动态结冰冰型微结构特征预测方法	201710854457.2	飞机表面	采用风洞实验、显微图像实验与相场模拟相结合的方法,建立了能预测飞机动态结冰冰型(包括宏观结冰形貌以及微观形貌与形核率)的方法
4	2019-08-20	王永斌 ^[42]	基于时间窗口混合模型的风机叶片预测方法及系统	201910260265.8	风机叶片表面	对监测数据进行特征压缩和数据压缩,并通过基于时间窗口的混合模型确定结冰时间块
5	2019-12-27	曹渝昆 ^[43]	一种基于特征选择和 XGBoost 的风机叶片结冰预测方法	201810819205.0	风机叶片表面	涉及风电机组的故障诊断领域,实时确定风机叶片结冰状态并作出决策
6	2020-08-07	周杰 ^[44]	结冰预测方法、装置、存储介质、模型生成方法及装置	201711341540.6	风机叶片表面	对不同地理位置的风力发电机组进行精确结冰情况预测
7	2020-10-09	柴聪聪 ^[45]	一种基于深度置信网络的翼型结冰冰形预测方法及装置	202010382051.0	飞机表面	对飞机翼型结冰冰形进行快速预测,同时适用于对称翼型与非对称翼型
8	2021-01-08	沈贺 ^[46]	一种风机叶片早期结冰故障预测方法	202110026131.7	风机叶片表面	基于机器学习,采用风机 SCADA 系统采集的数据对结冰故障早期进行建模与预测
9	2021-05-25	高远 ^[47]	一种基于深度学习的风机叶片结冰检测方法和存储介质	202011536521.0	风机叶片表面	一种基于深度学习的风机叶片结冰检测方法,实现对风机叶片覆冰故障的监测

表 1(续)

序号	公开日期	发明人	专利名称	专利号	应用表面	专利内容
10	2021-11-26	王福海 ^[48]	一种基于高速公路桥面气象结冰预测的交通运行风险防控方法	202110816132.1	道路表面	包括高速公路桥面气象数据采集、结冰预测、建立交通运行风险量化模型和制定交通运行风险防控对策
11	2022-08-30	潘攀 ^[49]	一种飞机结冰预测方法、系统及计算机程序产品	202210179640.8	飞机表面	通过决策树算法实现了从气象条件预测云中微物理参数,从而实现了根据气象条件预测飞机结冰概率、结冰严重程度以及结冰危害性评估
12	2022-10-08	汪峰 ^[50]	一种基于 GA-BP 神经网络的架空输电线覆冰厚度预测方法	202211221088.0	输电线表面	一种对输电线数据进行灰色关联分析,筛选出影响较大的气象因素,然后构建 GA-BP 网络的预测方法
13	2022-11-29	周超凡 ^[51]	基于 CEEMDAN-QFOA-LSTM 的输电线覆冰厚度预测方法	202011026983.8	输电线表面	通过 CEEMDAN 分解得到分量序列、QFOA 优化算法获取超参数,最后叠加多个 LSTM 的结果得到预测冰厚
14	2022-12-09	王旻轩 ^[52]	一种基于半监督式学习的风机叶片结冰检测的方法	201910439351.5	风机叶片表面	一种不依赖样本质量和故障标签的、物理规则结合机器学习模型的基于半监督式学习的风机叶片结冰检测方法
15	2023-01-06	陈斌 ^[53]	一种地面结冰温度预测方法、预测系统及计算机设备	202211102959.7	道路表面	属于民用航空地面积冰数据识别技术领域
16	2023-01-10	阳恩慧 ^[54]	一种模拟路面结冰的试验系统及方法	202210079793.5	道路表面	提供了多种路面结冰预测模型,并比选出效果最佳的路面结冰预测模型
17	2023-03-17	王磊 ^[55]	用于预测桥梁路段道路结冰的方法、控制器及存储介质	202211466800.3	道路表面	由环境历史数据得到预测数据,从而确定结冰厚度,并考虑特殊地形
18	2023-11-24	周琦浩 ^[56]	一种应用于飞机过冷大水滴结冰的潜势预报方法及系统	202311368945.4	飞机表面	采用有限气象特征组合对难以准确观测到过冷水的场景进行快速多级决策,从而为飞机航行选用适用度最高的潜势预测模式
19	2023-12-29	武健 ^[57]	基于气象参数的 OPGW 光缆覆冰预测方法、装置、设备及介质	202311354953.3	输电线表面	基于气象参数建模预测雨凇覆冰,对光缆覆冰的状态及持续时间进行分析与评估

如图 3(a) 的结冰预测技术分类图所示,按照原理的不同,结冰预测技术可以分为模型驱动法与数据驱动法两种。模型驱动法结冰预测技术是基于流体力学、相变传热学、空气动力学等学科的基本原理,构建基于传热传质与流动动力领域数值方程组的数理模型^[58],从而实现某确定低温表面上结冰预测的计算方法。它依赖于已知的物理定律与规则,能够更准确可靠地描述结冰过程。模型驱动法通常需要综合考虑表面物性、气象参数等多个结冰影响因素才能建立数学模型,但目前对多因素耦合模型研究较少。另外,此方法模型的建立和求解过程往往比较复杂,需要借助对比实验数据对较多相关参

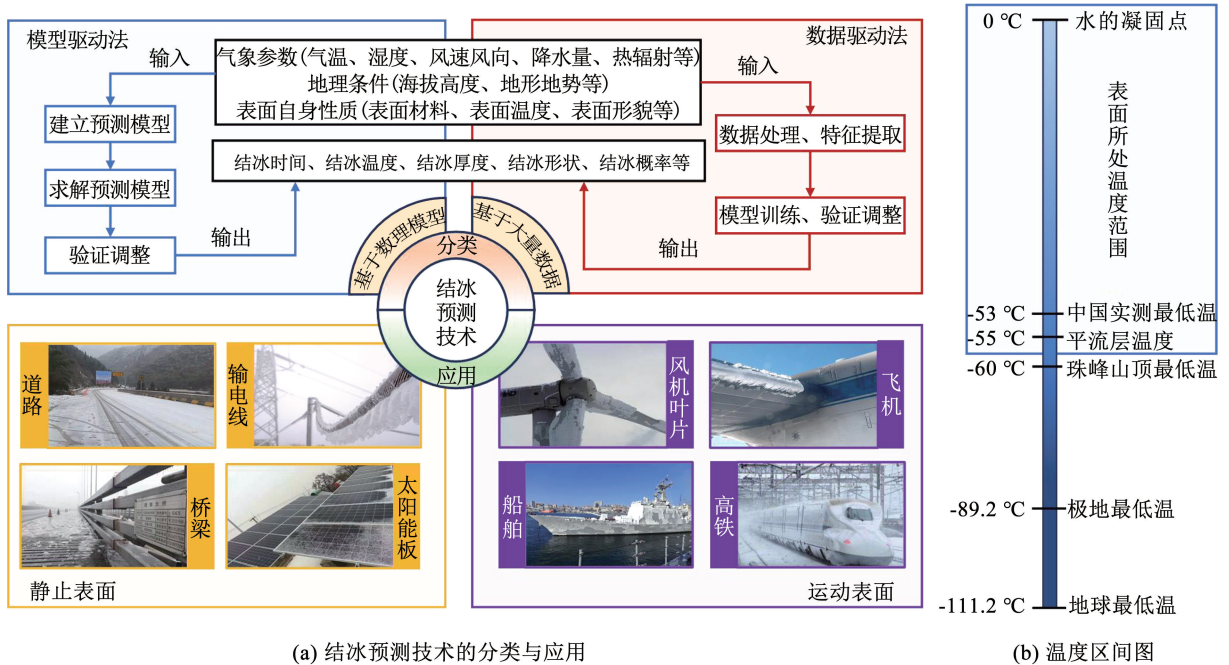
数进行多工况校准与验证。数据驱动法则是通过分析大量实际数据来获得其中的隐藏模式与数值规律,并基于此对结冰情况进行预测。在具体工况下对数据模型的特征和参数进行合理选择与调整后能得到相对较高的结冰预测准确率,因而该结冰预测技术具有较高的灵活性和适应性。但因其需要大量数据进行训练与调整,对数据的质与量都要求很高。

各类表面的结冰预测主要依赖于气象条件、地理信息和表面性质等参数,如环境温度、湿度、风速、风向、降水、海拔高度、表面温度、表面疏水性能等。模型驱动法将这些参数作为模型输入,通过求解构建的数理方程组得到预测结果。数据驱动法则对大

量历史参数与实时数据进行分析、建模从而实现结冰预测。结冰预测采取的预测依据也有多种,如结冰厚度、结冰时间、结冰温度、结冰形状、结冰概率等。由于不同表面所处应用场景不同,研究所关注的预测特征也有所不同,如飞机表面的结冰预测会关注机翼表面冰层形状,因为不同冰形对飞机气动性能影响不同,而道路表面结冰可能较少关注冰形,更多关注结冰时间、积冰厚度等。对于两类表面都会遇到的冰层不均匀性问题,一方面,结冰预测技术会选择将结冰厚度指标处理成最大厚度或平均厚度来进行规避;另一方面,对于运动表面而言,其对结冰形状进行模拟所得的结果,就能直观地反应冰层的不均匀性。

应用结冰预测技术的各类结冰冷表面可简单分

为静止表面与运动表面,图 3(a)展示了生产与生活中几种典型静止与运动表面的结冰现象,如道路、输电线、风机叶片和飞机表面。表 2 对比分析了静止与运动两类表面的差异,包括表面特性、温度分布、影响因素、应用环境、结冰预测方法以及预测难度。对比而言,运动表面的结冰预测技术难度更大。因其自身具有运动特性,多种动态因素的影响使得运动表面的结冰机制、冰层生长等过程更为复杂。本文选取道路与输电线两种静止表面、风机叶片和飞机两种运动表面进行研究,图 3(b)展示了讨论的两类冷表面所处环境的温度范围,即 $-55 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$,但实际上 4 种表面结冰现象多发生在 $-25 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度区间。对于液态水质量浓度这一影响结冰现象的重要参数,本文的研究范围为 $0.05 \sim 2.10 \text{ g/m}^3$ 。



(a) 结冰预测技术的分类与应用

(b) 温度区间图

图 3 结冰预测技术的分类与应用及温度区间图

Fig. 3 Classification and application diagram of icing prediction technology and temperature interval diagram

表 2 静止表面与运动表面的比较分析

Tab. 2 Comparative analysis of stationary and moving surfaces

序号	比较因素	静止表面结冰预测技术	运动表面结冰预测技术
1	表面特性	静止表面通常没有自身的运动,预测过程缺乏动态元素,相对简单但也更容易受外部条件的影响	动态,运动因素对温度分布和结冰过程有重要影响
2	温度分布	相对均匀,结冰点一般固定。但地形、微气候变化等可能导致局部温度差异,增加准确预测的难度	可能因运动而变化,存在动态温度分布
3	影响因素	主要受气象因素影响,如环境湿度、温度等。同时表面性质对结冰有较大影响,如不同表面材料会导致不同的结冰速率和结冰程度	同样受气象条件、表面性质等因素的综合影响,但运动也引入了其他因素,如空气动力学、动态压力、摩擦力等,增加了预测复杂性
4	应用环境	道路、输电线、土壤、太阳能板、桥梁等静止表面	风机叶片、飞机、船舶、高铁、火车等运动表面
5	结冰预测方法	主要基于气象数据,更多关注水滴的静态积累和结冰过程	需要考虑动态因素,如空气流场的影响、物体运动速度对水滴撞击特性和结冰过程的作用等
6	预测难度	相对较低	综合考虑动态特性,预测相对复杂

2 静止表面结冰预测研究

道路表面和输电线路表面是结冰预测技术应用中两种代表性的静止表面。当路面温度降至冰点以下时,水分会凝结成冰继而造成路面积冰覆冰现象。届时路面摩擦因数降低,车轮与路面间摩擦作用大幅减弱^[59]。车辆防滑能力急剧降低,车轮打滑必然造成制动距离增加及事故规避时间缩短^[60]。作为一种气象灾害,输电线表面结冰往往因气象条件、地理环境、导线工况等复杂因素综合导致^[61]。许多国家都曾发生因输电线路表面积冰覆冰而导致的导线舞动、线路断裂、支架倒塌等电力系统事故^[62]。输电线路表面积冰覆冰问题因其负面影响大、形成因素复杂,至今仍是一项结冰领域的科研难题^[63]。鉴于道路和输电线路的结冰灾害严重,采用结冰预测技术进行提前防治愈显重要,例如,公路交通气象学领域对道路结冰预测和监测的探索性研究在国际上早有报道^[64]。

2.1 模型驱动法结冰预测技术

对于道路表面结冰,已有研究人员基于传热学和相变理论建立了基本的路面结冰预测模型。其中,相变理论用于计算冰水相变过程中能量交换产生的潜热^[65]。针对沥青路面,Yang 等^[66]推导了特定的相变传热方程并通过有限元软件建立了预测模型。结合室内结冰模拟实验结果,得到模型预测的路面温度误差在 10% 以内,预测结冰持续时间的相对误差为 5.04%,验证了模型的有效性。而另一项研究综合考虑气候因素和各种路面材料特性后,建立了基于有限差分法求解的结冰预测模型^[67]。模

型的输入为气象数据与路面材料参数,输出则为路面温度、路面状态和平均覆冰厚度。研究同样也设计了室内试验对结果进行验证,并分析了相关参数的影响。结果表明,恒温下平均冰厚和路面温度的预测误差在 10% 以内,变温下平均冰厚预测误差为 7.83%。尤瑾语^[68]基于辐射传热基本理论设计了高速公路路面短时结冰预测模型,该模型利用辐射热平衡关系预测路面温度,预测误差小于 15%。Yang^[66]、Chen^[67]和尤瑾语^[68]的预测和实验结果如图 4(a) 所示。

系统动力学也是路面模型驱动法建模可用的基础理论。系统动力学通过描述动态系统内部各组成部分间的相互作用,并模拟其导致的系统动态行为变化,从而实现对系统未来状态的预测。基于系统动力学,Hong 等^[69]利用空间数据结合气象数据来设计参数的方法,对韩国 Honam 高速公路 14 h 的覆冰质量及结冰位置进行了模拟。图 4(b) 是不同覆冰质量路段分别在整条公路的长度占比,可知整条公路 14 h 的覆冰量都在 360 g 以上,且有 15% 以上的区域覆冰量超过 1 000 g,属于情况较严重路段。研究对结果进行了假设性检验,但并未进行验证。基于此研究,Hong 等^[70]结合深度神经网络和数值方法计算了道路温度这一预测模型中的重要中间因子,进一步提高了模型的可靠性,并利用实际传感器数据对模型进行了验证。模型结果得到 3 d 的黑冰数量和位置的平均值,模型均方根误差(root mean square error, E_{RMS}) 为 1.09,可靠性达到了 94.5%,相比之前研究分别提高了 148.6% 和 11.43%。

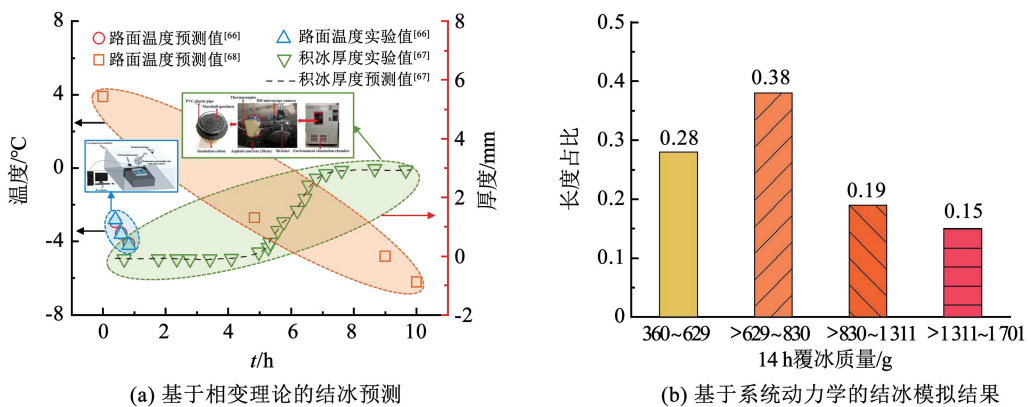


图 4 基于模型驱动法的道路表面结冰预测

Fig. 4 Road icing prediction based on model-driven approach

模型驱动法也是经典的输电线路表面积冰覆冰预测方法,既有经典输电线路表面结冰预测模型如表 3 所示。其中,Lenhard 模型^[71]、Imai 模型^[72]和 McComber 模型^[73]是早期根据观测实验结果得到的

经验模型。Goodwin 模型^[74]、Chaine 模型^[75]和 Jones 模型^[76]是简单的干增长数值模型,虽然不能准确反映输电线结冰过程,但由于其参数的易获得性,一定情况下也能得到较准确的预测结果。1984 年,

Makkonen 结合流体力学和传热学提出了更为严谨的覆冰预测模型^[77], 之后对输电线结冰的机制研究就主要集中在碰撞系数和冻结系数的确定上^[78]。基于热力学和空气动力学基本原理, 朱永灿等^[79]建立了输电线局部覆冰预测模型, 结果得到了较为准确的覆冰质量和冰形, 误差小于 6%。蒋兴良等^[80]

则提出一种最优时间步长模型, 对输电线覆冰质量和冰形进行了预测, 预测偏差在 10% 以内。输电线物理模型能够在一定程度上对输电线路表面结冰情况进行预测, 但由于结冰模型中气象等参数很难精确获得, 且模型构建环节包含大量结冰过程简化假设, 模型驱动法的结冰预测模型在精度上存在局限性。

表 3 经典输电线结冰预测模型

Tab. 3 Classical transmission line icing prediction model

序号	模型名称	模型基本假设	模型局限性	模型表达式	参考文献
1	Lenhard 模型	覆冰量仅与降水量呈线性关系	忽略了风速、温度、湿度等的影响, 模型过于简单	$M = C_1 + C_2 H_g$	[71]
2	Imai 模型	覆冰量受导线传热控制, 与温度(-T)成正比	常数 C 难确定且极端情况下假设条件很难成立	$R \frac{\Delta}{2} = C \sqrt{v} (-T) t$	[72]
3	McComber 模型	覆冰量随时间呈指数增长	常数 k 易变, 难确定且只能预测冰的增长趋势	$M = M_0 e^{kt}$	[73]
5	Goodwin 模型	与导线接触的液滴冻结成均匀圆筒形冰, 液滴收集系数为 1	温度接近 0 °C 时难以反映真实结冰过程	$\Delta R = \frac{\rho_0 H_g}{\rho_i \pi} \sqrt{1 + \left(\frac{v}{v_d}\right)^2}$	[74]
4	Chaine 模型	撞击导线的过冷水滴全冻结成形状不均匀的椭圆形冰	修正系数 k 依赖于覆冰厚度 ΔR , 难以准确界定	$\Delta R = \left[\frac{R_0 k}{2} \sqrt{(Pt)^2 + (wvt)^2} + R_0^2 \right]^{\frac{1}{2}} - R_0$	[75]
6	Jones 模型	电线为无限长的圆柱体并且覆冰均匀	假设条件存在缺陷且忽略了本身直径的影响	$\Delta R = \frac{1}{\rho_i \pi} \sum_{j=1}^N [(P\rho_0)^2 + (3.6wv)^2]^{\frac{1}{2}}$	[76]
7	Makkonen 模型	覆冰为圆形	实际覆冰不均匀且系数难以准确取值	$I = \frac{2}{\pi} E f w v$	[77]

2.2 数据驱动法结冰预测技术

静止表面的数据驱动法根据对数据的不同利用方式可分为统计分析法和数据挖掘法。统计分析法利用历史气候数据和结冰的观测数据, 通过统计分析建立数学模型从而对未来结冰情况进行预测。统计分析方法能够提供直观的公式, 具有一定的预测能力, 但其缺乏原理性解释, 并且统计分析法依赖于历史数据库, 其准确性和可靠性会受到数据质量和模型选择的影响, 有一定的空报率, 不易推广。数据挖掘法则是随着计算机技术和新兴人工智能技术的发展而诞生的新方法, 对数据进行分析 and 特征提取, 结合机器学习算法等技术实现结冰预测。与统计分析法相比, 数据挖掘法更注重从大规模的数据集中挖掘隐藏的模式和规律, 能使用更丰富的数据类型, 更适应于处理复杂的非线性关系。但其黑盒性较强, 方法解释性较差, 且模型的性能依赖于数据的质量和特征的选择。

2.2.1 统计分析法

Berrocal 等^[81]利用确定性的数值天气预报, 建立了两个温度和降水的联合分布预测概率模型, 从而得到了路面结冰概率, 提供了概率预测方法。两个模型结果均较为可靠, 其中, 空间模型预测空间聚

集体精度更高, 同时使用该方法的预测成本能够降低近 50%。然而, 该方法定义的理论模型以及模型参数的评估方法都需要进一步完善。Liu 等^[82]开发了一种结合多个道路结冰因素间动态依赖性的统计模型, 其使用 Copula 理论建立多个因素的联合分布, 由此得到结冰的发生概率, 并据此对道路的脆弱性等级以及冰灾风险区进行划分。图 5(a) 为该模型对黑龙江省冰灾风险区的划分结果, 可见东南部地区的冰灾风险更为严重, 其与实际的道路信息较为一致。此种方法对于寒冷地区道路结冰灾害的防治和快速评估具有重要意义, 但其模型并未考虑风速、风向等条件对结冰的影响。

输电线结冰预测的统计分析法常用经典模型为极值模型, 包括极值 I 型分布、极值 II 型分布和极值 III 型分布^[83]。极值模型主要关注灾害的重现期, 即灾害出现的频率。陆佳政等^[84]利用极值 I 型分布统计分析了湖南省 97 个气象站 58 a (1951—2008 年) 的覆冰天数观测数据, 得到湖南省覆冰特别严重地区的重现期为 24.8 a, 并绘制了如图 5(b) 所示的百年一遇型覆冰天数分布图为电网防冰控冰作参考。可以看出, 湖南省内大部分地区都属于覆冰特别严重的地区, 其中湘北程度较轻, 湘南覆冰更为严

transform, WT) 对非线性非平稳的数据进行处理, 并采用蝙蝠算法 (bat algorithm, BA) 优化的 ELM 进行预测。Wang 等^[96] 提出了一种结合集合经验模态分解、随机森林和经过混沌灰狼算法优化的 ELM 算法

模型, 对两条不同输电线路表面平均积冰厚度进行预测, 所得预测平均冰厚结果的 E_{RMS} 分别为 0.864 和 0.273, R^2 为 0.988 和 0.997 6, 精度很高。

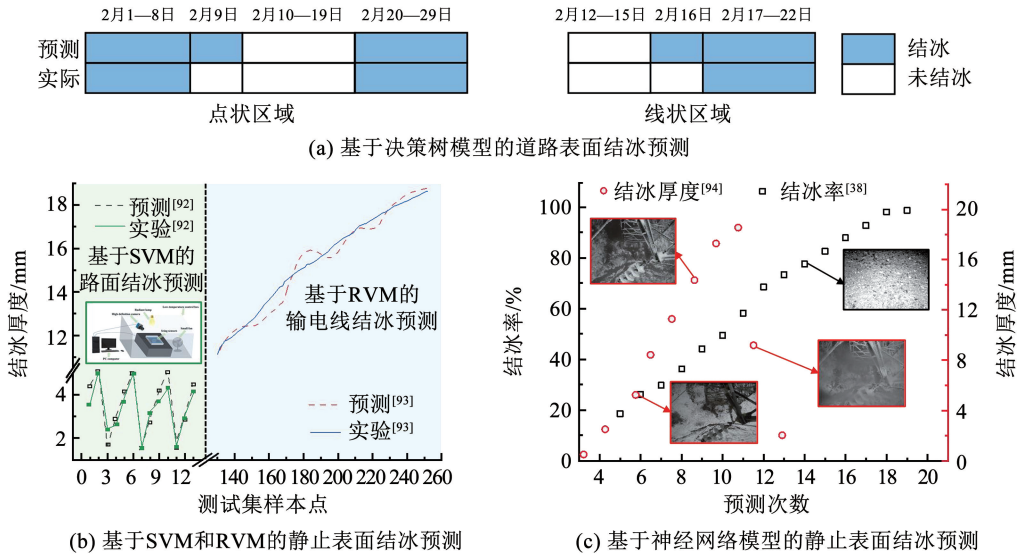


图 6 基于统计分析法的静止表面结冰预测

Fig. 6 Icing prediction on stationary surfaces based on data mining method

2.3 静止表面结冰特性预测技术总结

在静止表面, 如道路表面和输电线表面的防冰控冰应用中, 结冰预测技术发挥着重要的作用。结冰预测技术主要包括模型驱动法和数据驱动法, 其中, 依据对数据的不同使用方式, 数据驱动法又可分为统计分析和数据挖掘法。表 4 总结了所介绍的各类静止表面的结冰特性预测技术, 主要包括方法的输入输出以及预测精度。可以看出, 静止表面的结冰预测主要依靠气温、风速、湿度等气象参数, 预测结果则主要关注覆冰厚度、表面温度、结冰时间等指标。目前, 模型驱动法在静止表面的结冰预测中

仍发挥着关键作用, 现有的模型驱动法对于结冰时间和覆冰厚度等指标的预测误差在 15% 以内。数据驱动法也逐渐在结冰预测中展现出潜力, 通过对大量历史和实测数据的学习与训练, 能够适应实际情况的复杂性, 对于结冰时间、结冰厚度、结冰准确率等预测指标能够实现 80% 以上的预测精度。两种静止表面比较而言, 道路表面结冰预测精度提升的难度更大, 主要原因在于其影响因素更复杂, 地理条件、路面状态、车流情况、化学物质排放等因素都会影响道路实际结冰情况。

表 4 静止表面结冰特性预测技术总结

Tab. 4 Summary of techniques for predicting icing characteristics of stationary surfaces

序号	预测特性	精度	输入参数	预测表面	预测方法	作者
1	结冰时间、路面温度	温度和时间误差均小于 10%	风速、积水深度、环境温度	道路表面	模型驱动法	Yang 等 ^[66]
2	路面温度、路面状况、平均冰厚	恒温下温度和冰厚的误差均小于 10%, 变温下冰厚误差为 7.83%	气温、风速、降水量、路面材料、路面导热系数	道路表面	模型驱动法	Chen 等 ^[67]
3	路面温度	误差小于 15%	太阳辐射、预测间隔时间、路面温度	道路表面	模型驱动法	尤瑾语 ^[68]
4	路面温度、路面湿度、道路覆冰量、结冰位置	$E_{RMS} = 2.71$	气温、云量、蒸汽压、风速、降水量、山体阴影、道路/桥梁位置等	道路表面	模型驱动法	Hong 等 ^[69]
5	路面温度、路面湿度、道路覆冰量、结冰位置	$E_{RMS} = 1.05$	气温、云量、蒸汽压、风速、降水量、太阳辐射、山体阴影、道路/桥梁位置等	道路表面	模型驱动法	Hong 等 ^[70]
6	覆冰质量、覆冰形状	误差小于 6%	溢流水、表面温度、负荷电流等	输电线表面	模型驱动法	朱永灿等 ^[79]
7	覆冰质量、结冰冰形	误差小于 10%	风速、风向、液态水质量浓度、水滴中值体积直径、气温、导线直径	输电线表面	模型驱动法	蒋兴良等 ^[80]

表 4(续)

序号	预测特性	精度	输入参数	预测表面	预测方法	作者
8	结冰概率	Brier 评分小于 0.2	气温、降水量	道路表面	统计分析法	Berocal 等 ^[81]
9	结冰概率	—	月平均降水量、月平均气温	道路表面	统计分析法	Liu 等 ^[82]
10	覆冰天数	—	覆冰天数	输电线表面	统计分析法	陆佳政等 ^[84]
11	最大覆冰厚度	—	覆冰厚度	输电线表面	统计分析法	王建城等 ^[85]
12	道路结冰情况	准确率大于 80%	最低日气温、日降水量、日积雪深度	道路表面	数据挖掘法	陈凯等 ^[89]
13	结冰气象条件频率	冻雾下准确率大于 80%	气温、相对湿度、风速、风向、降水量、云层覆盖率	道路表面	数据挖掘法	Toms 等 ^[90]
14	结冰时间、平均覆冰厚度	时间和厚度的精度均大于 80%	风速、积水深度、环境温度	道路表面	数据挖掘法	Yang 等 ^[92]
15	平均覆冰厚度的增量	相对误差小于 10%	气温、相对湿度、风速、风向	输电线表面	数据挖掘法	Zhao 等 ^[93]
16	冻结率、结冰时间	相对误差小于 2%	冻结率	道路表面	数据挖掘法	熊竹等 ^[38]
17	平均覆冰厚度	平均精度为 91.18%	气温、空气湿度、最大张力、最大张力下的风偏角和倾斜角	输电线表面	数据挖掘法	He 等 ^[94]
18	平均覆冰厚度	E_{MAP} 小于 3%	气温、空气湿度、风速、风向、气压、光照强度	输电线表面	数据挖掘法	Sun 等 ^[95]
19	平均覆冰厚度	E_{RMS} 小于 0.9, R^2 大于 0.98	气温、空气湿度、风速、风向、气压、光照强度、冰层覆盖均匀度、雨雪持续时间、结冰时间	输电线表面	数据挖掘法	Wang 等 ^[96]

对于静止表面,模型驱动法未来的发展趋势主要是模型的精确化与多尺度模拟,从而更准确地捕捉真实环境中的复杂情况。同时,整合先进的气象和地理信息系统数据,以提高模型的时空分辨率和预测能力。此外,加强对模型参数的实地测量和验证,包括探究各类表面的结冰机制等,将有助于提高模型的可靠性。数据驱动方法的发展优化则包括更复杂的模型结构、更多样的数据集整合以及实时数据的应用。加强对特定地域和气象条件下数据驱动模型的训练有助于提高其准确性和泛化能力。此外,结合数据驱动法和模型驱动法的优势,发展两者相结合的方法也是未来结冰预测技术的研究方向。

3 运动表面结冰预测研究

风能作为技术成熟、适用广泛、可再生的绿色新能源,在全球能源经济领域具战略地位^[97]。风力涡轮机作为将风能转换为电能的重要设施,其工作状态直接决定能源获取效率。由于风能资源的地域分布特性,风力涡轮机往往安置在气候寒冷的高海拔或高纬度地区或是离岸的海上^[98]。在此类湿度高、温度低的气象环境中,风力涡轮机叶片表面的结冰现象成为整机工作的最大威胁。结冰会导致叶片的升阻比和功率降低、使用寿命缩短以及气动性能恶化,造成经济损失甚至危及风场人员及设备的安全^[99-100]。尽管采用超疏水涂层^[101]、喷洒化学试

剂^[102]、表面预热^[103]等方式可实现一定程度的防冰除冰效果,风机叶片表面结冰预测技术因处于结冰前期而极具研究价值。

飞机在飞行过程中会经历各种不同的运动形态,包括升降、滚转和偏航等,因此,飞机表面也是一种典型的运动表面。当飞机在飞行过程中穿越云层时,过冷水滴会撞击在飞机表面。在高空低温环境中,过冷水滴会在飞机表面迅速结冰^[104]。结冰不仅影响飞机的气动特性,造成阻力增大^[105],升力^[106]、失速迎角^[107]和飞行速度下降^[108],还会导致飞机产生翻滚、飞行员操作失灵^[109],继而影响飞行的稳定性和可控性。不规则冰块的随机脱落也会对飞机尾部部件和飞行状态造成安全威胁^[110]。飞行中飞机的迎风面上所有部件都有结冰的可能,比如风挡、机翼、机头罩、螺旋桨等,其中,对飞行安全影响较大的部位有机翼、尾翼、旋翼、发动机等^[111]。机翼、尾翼和旋翼是飞机的主要升力面,结冰主要发生在舵面前缘。

绕轴旋转的工作状态风机叶片与云中穿行的飞机表面均属典型的运动低温表面,其结冰原理为过冷水滴撞击结冰。目前,针对风机叶片表面及飞机表面结冰预测的研究方法也可分为模型驱动法与数据驱动法两种。运动表面的结冰预测离不开对结冰机制的理解,相关的结冰研究有飞行试验^[112]、结冰风洞试验^[113-114]、自然风电场试验^[115]等。对于风机叶

片和飞机表面等运动低温表面,已有一些成熟的结冰计算软件用于积冰生长模拟预测,如 LEWICE^[104]、FENSAP-ICE^[116]、ONERA^[117]、TRAJICE^[118]等。

3.1 模型驱动法结冰预测技术

利用扩展的 Messinger 结冰模型结合组合叶素动量理论 (blade element momentum theory, BEMT), Yirtici 等^[119]成功开发了一种预测不同大气条件下风力涡轮机叶片结冰形状、最大冰厚以及功率损失的数值方法。模型预测的积冰体积与厚度的精度误差区间为 3% ~ 20%。Strauss 等^[120]利用 Makkonen 结冰模型结合高分辨率的天气预报,研究了两个风电场机组的结冰预报,该模型能在 6 h 内进行较准确的结冰预测。Feng 等^[121]则基于灰色理论建立了输出为温度和湿度的预测模型,结合 LEWICE 仿真软件能够进一步实现对结冰形状、最大冰厚的预测。

对于飞机翼型结冰的模拟预测,经典的结冰模型有 Messinger 模型^[122]、Myers 模型^[123]、SWIM 模型^[124]等。基于欧拉模型,Shad 等^[125]提出了一种对

翼型结冰的形状和累积速率进行预测的方法。Dai 等^[126]则将冰和水看作一种流体,建立了基于相场法的冰形预测模型。与 LEWICE 模型结果相比,该模型预测的最大冰厚平均误差为 10.88%,能够很好地预测不同结冰条件下的冰形、冰厚、积冰速率等主要积冰特征。进一步结合紧密耦合法后提出的非定常结冰模型能够预测液滴阴影区^[127],且预测精度比 LEWICE 高 35%,最大冰厚平均误差为 9.05%。综合考虑离心力影响的情况下,Zhao 等^[128]提出了一种基于 Messenger 模型的悬停状态下旋翼结冰的三维数值预报方法。经过实验验证,该模型的预测结果与实验数据有良好的相关性,特别是在叶尖部分。在 Brouwers 等^[129]提出的基于 BEMT 模型的基础上,Rausa 等^[130]通过创建 3D 体积网格分析的方法进一步完善了叶片结冰模拟。图 7 显示了使用 Shad^[125]、Dai^[126-127]、Zhao^[128]和 Rausa^[130]模型对 NACA0012 型机翼的结冰预测结果。

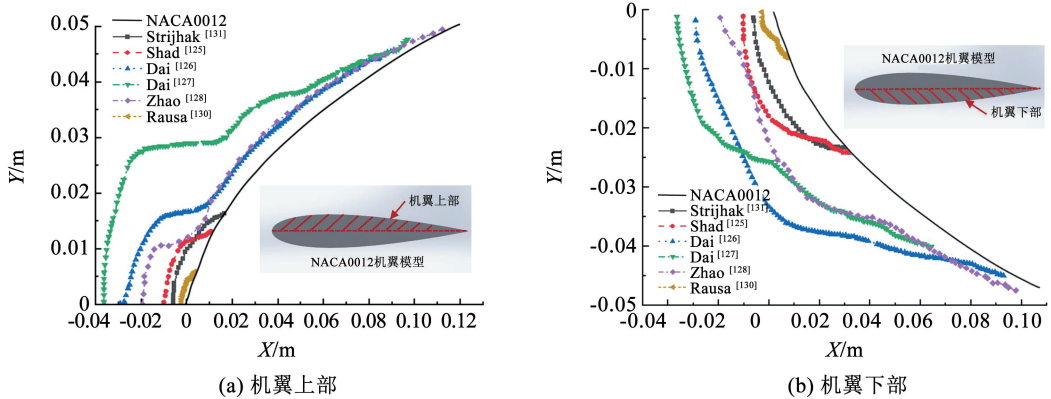


图 7 6 个 NACA0012 型机翼结冰预测模型的结果

Fig. 7 Results plot of six models that predict icing thickness of NACA0012

3.2 数据驱动法结冰预测技术

数据驱动法通过收集大量结冰的实测数据,并使用数据挖掘和机器学习等技术建立预测模型。数据驱动方法将输入参数与结冰程度进行关联,从而实现对运动表面结冰的预测。结合神经网络和数值模拟,Strijhak 等^[131]对 4 个不同的翼型进行了冰形预测,并使用 LEWICE 软件进行验证。结果显示,全连接网络和卷积网络能够得到较为准确的预测冰形,图 7 中黑色点线是其翼型结冰模拟结果,对各处冰层最大厚度的预测误差在 5% 以内。利用深度神经网络结合层叠式自动编码器,Yi 等^[132]建立了一种冰形预测模型,结果显示该模型能准确预测飞机的结冰形态,一致性指数为 94.4%。屈经国等^[133]基于深度神经网络预测模型,实现了低速不可压流动情况下任意翼型的结冰预测,对冰形的预测误差

在 15% 以内。

近年来,随着风力发电领域数据采集与监视控制 (supervisory control and data acquisition, SCADA) 系统的广泛应用以及计算机技术的大力发展,风力涡轮机结冰预测技术的数据驱动法逐渐成为领域研究热点。以监督机器学习为基础,Kreutz 等^[134]提出了一种使用 SCADA 的历史天气数据和外环境预测温度数据进行风机叶片结冰预测的方法。图 8(a)展示了该模型对结冰事件的预测准确数量以及精确度,可见该模型对于结冰情况的预测准确率要高于未结冰情况,并且其整体结冰事件的预测准确度达 83.7%,但该模型的输入输出数据均有时间范围限制。在此研究基础上,Kreutz 等^[135]重新提出一种称作 Bikice 模型的双输入一维卷积神经网络模型,其输入和输出时间范围均拓展到了 24 h。图 8(b)使

用 Bikice 模型对 3 个不同风电场进行 24 h 的结冰预测,结果显示,对风电场 P1 的预测精度最高,P3 的预测精度最低,但三者平均精度均高于 96%。Kreutz 等^[136]又使用 2020 和 2021 年最新的冬季数据对该模型进行了评估。在分析得到风力机叶片结冰预测问题的本质是基于数据驱动的时序分析问题之后,Zhang 等^[137]提出了一种结合循环神经网络和基于 t 分布的随机近邻嵌入降维算法的预测方法。

该模型输入为叶片历史数据和标签,能够得到未来某时刻风力机叶片的结冰状态,与其他算法相比,该模型的预测精度提高了 100% 以上。Li 等^[138]结合一维 CNN 和堆叠式双向门控循环单元对风机叶片结冰问题进行预测,并提出了一套创造性的预测精度评价指标。该模型的精度能达到 94.58%,相比其他算法其准确度提高了 14.44% 以上。

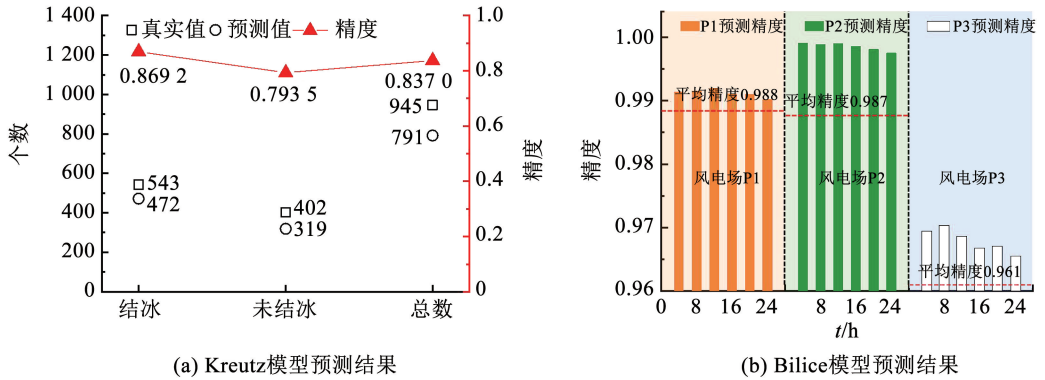


图 8 基于数据驱动法的风机叶片结冰预测

Fig. 8 Icing prediction of wind turbine blades based on data-driven approach

3.3 运动表面结冰特性预测技术总结

风机叶片表面和飞机表面等运动表面的结冰预测技术同样也可以分为模型驱动法和数据驱动法,表 5 对其输入参数、输出结果与预测精度进行了总结。与静止表面相比,运动表面的结冰过程和影响因素更为复杂,结冰预测技术关注的相关特征也有所不同。对于输入参数而言,除气象数据外,运动表面的主要输入参数还包括中值体积直径、液态水质量浓度等微观物理参数以及飞行速度、叶片转速等自身运动参数,风机叶片的结冰预测还会进一步考虑发电机温度等机舱性质。对于输出结果而言,结冰形状是运动表面最为关注的特征,对结冰形状进

行模拟预测后还能进一步得到积冰厚度、积冰增量等特征。模型驱动法依然是运动表面重要的预测手段,相比静止表面会进一步考虑运动表面自身动态运动的特性,如结合空气动力学等原理来模拟飞机或风机在空中运动时的结冰过程。然而,模型通常也要求复杂的计算和精准的输入参数,因此,在实际应用中也存在挑战。数据驱动法则能更好地捕捉结冰过程的非线性关系,针对不同运动表面和气象条件进行调整。在风机叶片和飞机表面的现有研究中,两种方法对于积冰厚度、结冰轮廓等指标的预测精度基本能达到 70% 以上。

表 5 静止表面结冰特性预测技术总结

Tab. 5 Summary of techniques for predicting icing characteristics of moving surfaces

序号	预测特性	精度	输入参数	预测表面	预测方法	作者
1	叶片冰形、最大冰厚、发电损失	误差为 3% ~ 25%	气压、湿度、风速、液态水质量浓度、中值体积直径、环境温度等	风机叶片表面	模型驱动法	Yirtici 等 ^[119]
2	表面温度、露点温度、风速	—	气温、相对湿度、风速、中值体积直径、液态水密度等	风机叶片表面	模型驱动法	Strauss 等 ^[120]
3	表面温度、湿度、冰形、平均冰厚	平均误差小于 15%	气温、气压、风速、液态水质量浓度、液滴直径、相对湿度、叶片转速等	风机叶片表面	模型驱动法	Feng 等 ^[121]
4	冰形、最大冰厚、未冻结水膜厚度	—	环境温度、飞行速度、液态水质量浓度等	飞机表面	模型驱动法	Shad 等 ^[125]
5	冰形、最大冰厚、冰质量分数	冰厚平均偏差为 10.88%	液态水质量浓度、中值体积直径、环境温度	飞机表面	模型驱动法	Dai 等 ^[126]

表 5(续)

序号	预测特性	精度	输入参数	预测表面	预测方法	作者
6	冰形、最大冰厚等	冰厚平均偏差为 9.05%	气压、气温、液态水质量浓度、中值体积直径等	飞机表面	模型驱动法	Dai 等 ^[127]
7	冰形	—	液态水质量浓度、中值体积直径、翼型、表面温度、离心力等	风机叶片表面	模型驱动法	Zhao 等 ^[128]
8	冰形	—	液态水质量浓度、环境温度等	风机叶片表面	模型驱动法	Rausa 等 ^[130]
9	冰形	冰厚误差小于 5%	气温、气压、飞行速度、翼型、液滴直径、液态水质量浓度、结冰时间	飞机表面	数据驱动法	Strijhak 等 ^[131]
10	冰形	冰形一致性指数为 94.4%	风速、气温、中值体积直径、液态水质量浓度、结冰时间	飞机表面	数据驱动法	Yi 等 ^[132]
11	冰形、最大冰厚、冰角等	冰形误差小于 15%	液态水质量浓度、中值体积直径、结冰持续时间、气温等	飞机表面	数据驱动法	屈经国等 ^[133]
12	结冰事件、结冰持续时间	准确率为 83.4%	风速、风向、叶片转速、机舱温度、发电机温度、齿轮箱温度、气温	风机叶片表面	数据驱动法	Kreutz 等 ^[134]
13	结冰事件、结冰持续时间	精度高于 96%	气温、风速、湿度、气压	风机叶片表面	数据驱动法	Kreutz 等 ^[135]
14	结冰事件、结冰持续时间	精度可达 83%	气温、风速、湿度、气压	风机叶片表面	数据驱动法	Kreutz 等 ^[136]
15	结冰状态	精度最高达 72%	风速、风向、环境温度、发电机转速、叶片转速、时间、发电机温度等	风机叶片表面	数据驱动法	Zhang 等 ^[137]
16	结冰概率	精度可达 95%	风速、风向、气温、发电机转速、叶片转速等	风机叶片表面	数据驱动法	Li 等 ^[138]

未来运动表面的可发展方向有提高运动表面结冰模型的精度和实时性,以适应快速变化的环境条件。进一步整合空气动力学和材料科学等领域的进展,以优化模型对动态表面结冰行为的理解。同时,结合先进的数值计算和仿真技术,提高模型的计算效率。对于数据驱动法,则需进一步结合实时监测数据,建立更为精细化和个性化的数据驱动模型。此外,加强对数据的质量管理和处理,以及处理动态运动表面所带来的数据异质性,实现对运动表面结冰行为更为准确的预测。

4 结论与展望

本文针对道路与输电线两种静止表面、风机叶片和飞机两种运动表面的既有结冰特性预测技术进行了梳理与归纳,得到如下结论与展望:

1) 运动与静止两类表面的结冰预测技术可分为模型驱动法与数据驱动法两种,其实际研究的温度范围为 $-25 \sim 0$ °C。两类表面的结冰预测技术均依赖于各类气象数据,此外运动表面的预测依据还包括自身运动参数及微观物理参数等。对于预测特性,静止表面关注积冰厚度、结冰时间等,运动表面则更关注结冰形状。既有结冰预测技术对静止表面结冰厚度等指标的预测精度均可达 80% 以上,而运动表面可达 70% 以上。相比静止表面,运动表面因

自身运动特性而呈现出更为复杂多变的结冰行为和机制,因此,其结冰预测也更为困难。

2) 结冰预测技术的数据驱动法在未来有较大的发展潜力。一方面,其能综合考虑多种结冰影响因素,自动学习并构建复杂模型;另一方面,其能结合实时监测数据自动调整模型参数,从而实现模型的自我优化和适应。但该方法解释性较差,无法体现结冰过程的物理意义,因此,若其能与结冰物理模型相结合,该方法的结冰预测精度可获得进一步提高。如能在结冰过程的实验研究中不断获得基础研究突破,结冰预测技术的预测精度将获得持续提高。

3) 既有结冰预测技术仍存在着实现高精度实时动态预测的困难。高精度实时预测的难以实现一方面是因为现有技术的数据获取与传输方面存在局限性。气象数据或传感器数据的实时获取,有赖于先进的监测技术及新型数学算法的提升与优化;另一方面是由于目前对复杂环境结冰机制的理论研究较少,未来还需深入结冰基础研究,揭示结冰过程、冰层形态、传质流动等基础规律,从而实现理解结冰本质,优化传感技术和结冰预测模型。上述问题的解决依赖于多学科的交叉合作,传热传质学、流体力学、界面科学、数学、计算机科学等学科的协同合作将有助于形成更为全面的结冰预测框架,从而提高预测的准确性、实用性和及时性。

参考文献

- [1] ZHANG Long, SONG Mengjie, DENG Shiming, et al. Frosting mechanism and behaviors on surfaces with simple geometries: a state-of-the-art literature review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 215: 118984. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118984
- [2] SONG Mengjie, DENG Shiming, DANG Chaobin, et al. Review on improvement or air source heat pump units during frosting and defrosting[J]. *Applied Energy*, 2018, 211: 1150. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.022
- [3] SONG Mengjie, LEI Shangwen, HOSSEINI S, et al. An experimental study on the effect of horizontal cold plate surface temperature on frosting characteristics under natural convection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118416. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118416
- [4] LEI Shangwen, SONG Mengjie, DANG Chaobin, et al. Experimental study on the effect of surface temperature on the frost characteristics of an inverted cold plate under natural convection[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 211: 118470. DOI: 10.2139/ssrn.4019231
- [5] LAFORTE J L, ALLAIRE M, LAFLAMME J. State-of-the-art on power line de-icing[J]. *Atmospheric Research*, 1998, 46: 143. DOI: 10.1016/S0169-8095(97)00057-4
- [6] 邱超, 杨京龙, 寇祎. 飞机防冰除冰技术的研究进展[J]. *西安航空学院学报*, 2023, 41(3): 1
QIU Chao, YANG Jinglong, KOU Yi. Research progress of anti-icing and de-icing technology for aircraft[J]. *Journal of Xi'an Aeronautical Institute*, 2023, 41(3): 1. DOI: 10.20096/j.xhxb.1008-9233.2023.03.001
- [7] ZHANG Zhijin, ZHANG Hang, YUE Song, et al. A review of icing and anti-icing technology for transmission lines[J]. *Energies*, 2023, 16(2): 601. DOI: 10.3390/en16020601
- [8] BAIDYA A, GANAYEE M A, RAVINDRAN S J, et al. Organic solventfree fabrication of durable and multifunctional superhydrophobic paper from waterborne fluorinated cellulose nanofiber building blocks[J]. *ACS Nano*, 2017, 11: 11091. DOI: 10.1021/acsnano.7b05170
- [9] COFFMAN H J. Helicopter rotor icing protection methods[J]. *Journal of the American Helicopter Society*, 1987, 32(2): 34. DOI: 10.4050/JAHS.32.34
- [10] OU Yan. Review on icing detection techniques of pavement[J]. *Highway*, 2013(4): 191
- [11] SALERNO R, CEPPI A, MANCINI M, et al. A study of an algorithm for the surface temperature forecast: from road ice risk to farmland application[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(14): 4952. DOI: 10.3390/app10144952
- [12] ZHANG Haigang, ZHOU Haoqiang, ZHAO Decheng, et al. Harmonic characteristics and negative sequence analysis of regenerative braking for high-speed railway[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2023, 16(3): 214. DOI: 10.2174/2212797616666230612162748
- [13] 王聪, 黄洁亭, 张勇, 等. 风电机组叶片结冰研究现状与进展[J]. *电力建设*, 2014, 35(2): 70
WANG Cong, HUANG Jieting, ZHANG Yong, et al. Status and advance in research on blade icing of wind turbines[J]. *Power Construction*, 2014, 35(2): 70
- [14] 胡毅. 电网大面积冰灾分析及对策探讨[J]. *高电压技术*, 2008(2): 215
HU Yi. Analysis and countermeasures discussion for large area icing accident on power grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2008(2): 215. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.02.020
- [15] MA Tiannan, NIU Dongxiao, FU Ming. Icing forecasting for power transmission lines based on a wavelet support vector machine optimized by a quantum fireworks algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(2): 54. DOI: 10.3390/app6020054
- [16] YANG Wenting, LIU Yefeng, HU Jiwei, et al. Research on the influence of high-low pressure volume ratio and discharge pressure on the heating performance of transcritical CO₂ single-machine two-stage compression heat pump water heater[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2022, 15(4): 393. DOI: 10.2174/2212797615666220428144047
- [17] FENG Haocheng, LIU Zhenzhen, WANG Zilong, et al. The molecular dynamics simulation of thermal properties of R290 for auto-cascade refrigeration system[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2023, 16(5): 345. DOI: 10.2174/2212797616666230817123923
- [18] DONG Yiqun. An application of deep neural networks to the in-flight parameter identification for detection and characterization of aircraft icing[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018: 77. DOI: 10.1016/j.ast.2018.02.026
- [19] PETTY K R, FLOYD C D J. A statistical review of aviation airframe icing accidents in the US[J]. *Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, 2004, 11(2): 623
- [20] RAYHAN S B, YU Chunjin, RAHMAN M M, et al. Advances and future challenges in aircraft fuselage section crashworthiness: a critical review[J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2023, 16(5): 309. DOI: 10.2174/2212797616666230905161308
- [21] KALITA A, MROZEK-MCCOURT M, KALDAWI T F, et al. Microstructure and crystal order during freezing of supercooled water drops[J]. *Nature*, 2023, 620: 557. DOI: 10.1038/s41586-023-06283-2
- [22] HUANG Xudan, WANG Lifen, LIU Keyang, et al. Tracking cubic ice at molecular resolution[J]. *Nature*, 2023, 617: 86. DOI: 10.1038/s41586-023-05864-5
- [23] ALEXANDER R, MICHAEL B D, ALFRED A, et al. Medium-density amorphous ice[J]. *Science*, 2023, 379: 474. DOI: 10.1126/science.abq2105
- [24] XU Peizhen, CUI Bowen, BU Yeqiang, et al. Elastic ice microfibers[J]. *Science*, 2021, 373: 187. DOI: 10.1126/science.abh3754
- [25] ZASTROW M. Water-repellent coatings could make de-icing a breeze[J]. *Nature*, 2017. DOI: 10.1038/nature.2017.22790
- [26] LAURA L, ARPA H, BARON P, et al. Role of stacking disorder in ice nucleation[J]. *Nature*, 2017, 551(7679): 218. DOI: 10.1038/nature2427
- [27] BENJAMIN J M. Cracking the problem of ice nucleation[J]. *Science*, 2017, 355(6323): 346. DOI: 10.1126/science.aam53
- [28] SELLBERG J A, HUANG C, MCQUEEN T A, et al. Ultrafast X-ray probing of water structure below the homogeneous ice nucleation temperature[J]. *Nature*, 2014, 510: 381. DOI: 10.1038/nature13266
- [29] TAVAKOLI F, DAVIS S H, KAVEHPOUR H P. Freezing of supercooled water drops on cold solid substrates: initiation and mechanism[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2015, 12: 869. DOI: 10.1007/s11998-015-9693-0

- [30] 张旋. 过冷水滴的结冰与碰撞及其耦合特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2019
ZHANG Xuan. Research on freezing and impact processes of supercooled water droplet and their coupling characteristics [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019
- [31] HUANG Lizhen, TIAN Yueyang, SONG Mengjie, et al. Experimental study of relative humidity effect on the edge effect of frosting characteristics on a vertical cold plate surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 236: 121537. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121537
- [32] 刘鑫, 张旋, 闵敬春. 壁面静止水滴冻结过程形状变化[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(3): 704
LIU Xin, ZHANG Xuan, MIN Jingchun. Shape variation of sessile water droplet during freezing [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(3): 704
- [33] ISMAIL M F, WAGHMARE P R. Universality in freezing of an asymmetric drop[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(23): 234105
- [34] BOREYKO J B, COLLIER C P. Delayed frost growth on jumping-drop superhydrophobic surfaces[J]. ACS Nano, 2013, 7(2): 1618. DOI: 10.1021/nn3055048
- [35] 苏伟, 马东旭, 金旭, 等. 表面润湿性对霜层传递特性影响可视化实验研究[J]. 化工学报, 2023, 74(增刊1): 122
SU Wei, MA Dongxu, JIN Xu, et al. Visual experimental study on effect of surface wettability on frost propagation characteristics[J]. CIESC Journal, 2023, 74(Sup.1): 122
- [36] CHU Fuqiang, LIN Yukai, YAN Xiao, et al. Quantitative relations between droplet jumping and anti-frosting effect on superhydrophobic surfaces[J]. Energy and Buildings, 2020, 225: 110315. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110315
- [37] CHU Fuqiang, WU Xiaomin, ZHU Bei, et al. Self-propelled droplet behavior during condensation on superhydrophobic surfaces [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(19): 194103. DOI: 10.1063/1.4949010
- [38] 熊竹, 秦杰君. 基于模拟实验的路面结冰预测研究[J]. 公路工程, 2014, 39(1): 216
XIONG Zhu, QIN Jiejun. A study of road surface ice prediction based on simulate experiment [J]. Highway Engineering, 2014, 39(1): 216
- [39] 陈斌. 一种机场道面积冰预警系统及其预警方法: 201710414813.9[P]. 2019-01-29
CHEN Bin. An airport runway area ice warning system and its warning method; 201710414813.9[P]. 2019-01-29
- [40] 王馨. 一种输电线覆冰概率预测方法: 201811348695.7[P]. 2019-03-12
WANG Xin. A method for predicting the probability of power line icing; 201811348695.7[P]. 2019-03-12
- [41] 杜雁霞. 一种飞机动态结冰冰型微结构特征预测方法: 201710854457.2[P]. 2019-06-18
DU Yanxia. A method for predicting the characteristics of dynamic icing microstructure of aircraft; 201710854457.2[P]. 2019-06-18
- [42] 王永斌. 基于时间窗口混合模型的风机叶片预测方法及系统: 201910260265.8[P]. 2019-08-20
WANG Yongbin. Wind turbine blade prediction method and system based on time window hybrid model; 201910260265.8[P]. 2019-08-20
- [43] 曹渝昆. 一种基于特征选择和 XGBoost 的风机叶片结冰预测方法: 201810819205.0[P]. 2019-12-27
CAO Yukun. A prediction method for icing of wind turbine blades based on feature selection and XGBoost; 201810819205.0[P]. 2019-12-27
- [44] 周杰. 结冰预测方法、装置、存储介质、模型生成方法及装置: 201711341540.6[P]. 2020-08-07
ZHOU Jie. Icing prediction method, device, storage medium, model generation method and device; 201711341540.6[P]. 2020-08-07
- [45] 柴聪聪. 一种基于深度置信网络的翼型结冰冰形预测方法及装置: 202010382051.0[P]. 2020-10-09
CHAI Congcong. A method and device for predicting the ice shape of airfoil ice based on deep belief network; 202010382051.0[P]. 2020-10-09
- [46] 沈贺. 一种风机叶片早期结冰故障预测方法: 202110026131.7 [P]. 2021-01-08
SHEN He. A method for predicting early icing faults of wind turbine blades; 202110026131.7[P]. 2021-01-08
- [47] 高远. 一种基于深度学习的风机叶片结冰检测方法和存储介质: 202011536521.0[P]. 2021-05-25
GAO Yuan. A method and storage medium for ice detection of wind turbine blades based on deep learning; 202011536521.0[P]. 2021-05-25
- [48] 王福海. 一种基于高速公路桥面气象结冰预测的交通运行风险防控方法: 202110816132.1[P]. 2021-11-26
WANG Fuhai. A traffic operation risk prevention and control method based on meteorological icing prediction of highway bridge deck; 202110816132.1[P]. 2021-11-26
- [49] 潘攀. 一种飞机结冰预测方法、系统及计算机程序产品: 202210179640.8[P]. 2022-08-30
PAN Pan. Aircraft icing prediction method, system and computer program product; 202210179640.8[P]. 2022-08-30
- [50] 汪峰. 一种基于 GA-BP 神经网络的架空输电线覆冰厚度预测方法: 202211221088.0[P]. 2022-10-08
WANG Feng. A method for predicting the icing thickness of overhead transmission lines based on GA-BP neural network; 202211221088.0[P]. 2022-10-08
- [51] 周超凡. 基于 CEEMDAN-QFOA-LSTM 的输电线覆冰厚度预测方法: 202011026983.8[P]. 2022-11-29
ZHOU Chaofan. Prediction method of transmission line icing thickness based on CEEMDAN-QFOA-LSTM; 202011026983.8 [P]. 2022-11-29
- [52] 王旻轩. 一种基于半监督式学习的风机叶片结冰检测的方法: 201910439351.5[P]. 2022-12-09
WANG Minxuan. A method for ice detection of wind turbine blades based on semi-supervised learning; 201910439351.5[P]. 2022-12-09
- [53] 陈斌. 一种地面结冰冰温度预测方法、预测系统及计算机设备: 202211102959.7[P]. 2023-01-06
CHEN Bin. A ground icing temperature prediction method, prediction system and computer equipment; 202211102959.7[P]. 2023-01-06
- [54] 阳恩慧. 一种模拟路面结冰的试验系统及方法: 202210079793.5 [P]. 2023-01-10
YANG Enhui. Test system and method for simulating road surface icing; 202210079793.5[P]. 2023-01-10
- [55] 王磊. 用于预测桥梁路段道路结冰的方法、控制器及存储介质: 202211466800.3[P]. 2023-03-17
WANG Lei. Method, controller, and storage medium for predicting road icing in bridge sections; 202211466800.3[P]. 2023-03-17
- [56] 周琦浩. 一种应用于飞机过冷大水滴结冰的潜势预报方法及系统: 202311368945.4[P]. 2023-11-24

- ZHOU Qihao. A potential prediction method and system applied to the freezing of large water droplets under supercooling of aircraft; 202311368945.4[P]. 2023-11-24
- [57] 武健. 基于气象参数的 OPGW 光缆覆冰预测方法、装置、设备及介质; 202311354953.3[P]. 2023-12-29
- WU Jian. OPGW fiber optic cable icing prediction method, apparatus, equipment and medium based on meteorological parameters; 202311354953.3[P]. 2023-12-29
- [58] SHETTY V V, BALASHANKER K, DHARMARAJ P A, et al. Analysis of fluid flows in bounded domain with particular shape of a cavity using lattice boltzmann method [J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2023, 16(5): 359. DOI: 10.2174/2212797616666230803115517
- [59] ILKKA J, PERTTI N, MARJO H. Statistical modelling of wintertime road surface friction [J]. *Meteorological Applications*, 2013, 20: 318. DOI: 10.1002/met.1285
- [60] SAHAR S, SOMAYEH N, ALIREZA B, et al. Lateral coefficient of friction for characterizing winter road conditions [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2015, 43(1): 73. DOI: 10.1139/cjce-2015-0222
- [61] 庄文兵, 张海斌, 赵宏宇, 等. 电线覆冰预报模型研究综述 [J]. *气象科技进展*, 2017, 7(2): 6
- ZHUANG Wenbin, ZHANG Haibin, ZHAO Hongyu, et al. Review of the research for powerline icing prediction [J]. *Progress in Meteorological Science and Technology*, 2017, 7(2): 6
- [62] LIU Chuncheng, LIU Jiao. Ice accretion cause and mechanism of glaze on wires of power transmission lines [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 189. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.3238
- [63] 蒋兴良, 张志劲, 胡琴, 等. 再次面临电网冰雪灾害的反思与思考 [J]. *高电压技术*, 2018, 44(2): 463
- JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, HU Qin, et al. Thinkings on the restrike of ice and snow disaster to the power grid [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(2): 463. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20180131017
- [64] MAHONEY W, MYERS W. Predicting weather and road conditions: integrated decision-support tool for winter road-maintenance operations [J]. *Transportation Research Record*, 2003; 1824. DOI: 10.3141/1824-11
- [65] FUJIMOTO A, TOKUNAGA R A, KIRIISHI M, et al. A road surface freezing model using heat, water and salt balance and its validation by field experiments [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 106: 1. DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.06.001
- [66] YANG Enhui, PENG Jiahui, LUO Lei, et al. Analysis on influencing factors of asphalt pavement icing and establishment of icing prediction model [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2023, 24: 2959. DOI: 10.1080/14680629.2023.2185466
- [67] CHEN Jiaqi, SUN Changqing, SUN Xiao, et al. Finite difference model for predicting road surface ice formation based on heat transfer and phase transition theory [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2023, 207(11): 103772. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103772
- [68] 尤谨语. 高速公路路面凝冰预警与交通流调度策略研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016
- YOU Jinyu. Research on ice warning and traffic flow scheduling strategy of expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016
- [69] HONG S B, LEE B W, KIM C H, et al. System dynamics modeling for estimating the locations of road icing using GIS [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(18): 8537. DOI: 10.3390/app11188537
- [70] HONG S B, YUN H S, YUM S, et al. Development of black ice prediction model using GIS-based multi-sensor model validation [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22: 3435. DOI: 10.5194/nhess-2022-147
- [71] LENHARD R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1955, 36: 1
- [72] IMAI I. Studies on ice accretion [J]. *Researches on Snow and Ice*, 1953, 3(1): 35
- [73] COMBER P J W. An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at Mount Washington [M]. *Montreal: Proceedings of the Forty-second Annual Eastern Snow Conference*, 1985
- [74] GOODWIN E J I, MOZER J D, DIGIOIA A M J, et al. Predicting ice and snow loads for transmission lines [J]. *Proceedings First IWAIS*, 1983: 267
- [75] CHAINE P M, CASTONGUAY G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle-like conductors [J]. *Industrial Meteorology Study IV: Environment*, 1974
- [76] JONES K F. A simple model for freezing rain ice loads [J]. *Atmospheric Research*, 1998, 46(1): 87
- [77] MAKKONEN L. Heat transfer and icing of a rough cylinder [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1985, 10(2): 105. DOI: 10.1016/0165-232X(85)90022-9
- [78] 何青, 李军辉, 邓梦妍, 等. 架空输电导线覆冰冻系数计算及其影响因素分析 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 4162
- HE Qing, LI Junhui, DENG Mengyan, et al. Calculation and influencing factors of icing freezing coefficient of overhead transmission line [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 4162. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.181398
- [79] 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 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(7): 120
- ZHU Yongcan, HUANG Xinbo, JIA Jianyuan, et al. Numerical simulation for icing and influence on transmission line [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(7): 120
- [80] 蒋兴良, 姜方义, 汪泉霖, 等. 基于最优时间步长模型的输电导线雾凇覆冰预测 [J]. *电工技术学报*, 2018, 33(18): 4408
- JIANG Xingliang, JIANG Fangyi, WANG Quanlin, et al. Prediction of rime accretion on transmission line based on optimal time step model [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(18): 4408. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170941
- [81] BERROCAL V J, RAFTERY A E, GNEITING T, et al. Probabilistic weather forecasting for winter road maintenance [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 2010, 105: 522. DOI: 10.1198/jasa.2009.ap07184
- [82] LIU Qiang, TANG Aiping, WANG Zhongyue, et al. Exploring the road icing risk: considering the dependence of icing-inducing factors [J]. *Natural Hazards*, 2023, 115(3): 2178. DOI: 10.1007/s11069-022-05632-0
- [83] 刘畅. 基于马尔可夫过程的输电线路覆冰厚度预测模型研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015
- LIU Chang. Research of transmission lines icing thickness prediction model based on Markov process [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015
- [84] 陆佳政, 张红先, 彭继文, 等. 基于极值型概率分布模型的湖南

- 地区电网覆冰重现期计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 464
 LU Jiazheng, ZHANG Hongxian, PENG Jiwen, et al. Calculation of Hunan power grid icing recurrence interval based on extreme-value type I probability distribution model [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 464
- [85] 王建城, 苏盛, 盛小勇, 等. 输电线路多年一遇极值覆冰估计方法适用性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2614
 WANG Jiancheng, SU Sheng, SHENG Xiaoyong, et al. Comparative study of applicability of methods for estimating transmission line icing return period based on various extreme value distributions[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2614
- [86] CHEN Yu, LU Youjie, DUAN Ronghua, et al. A forecast method of ice flashover fault early warning based on partial mutual information and support vector machine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (2): 92. DOI: 10. 7500/AEPS20170612014
- [87] 李大中, 刘家瑞, 张华英. 基于深度全连接神经网络的风机叶片结冰预测方法[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(4): 39
 LI Dazhong, LIU Jiarui, ZHANG Huaying. Prediction method of fan blade icing based on deep fully connected neural network[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(5): 39
- [88] ZHANG Wei, GAO Si, CHEN Bin, et al. The application of decision tree to intensity change classification of tropical cyclones in western North Pacific [J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(9): 1883. DOI: 10. 1002/grl. 50280
- [89] 陈凯, 徐国庆, 熊焱, 等. 基于 C4.5 决策树算法的道路结冰预报模型构建与应用[J]. 交通运输研究, 2018, 4(1): 57
 CHEN Kai, XU Guoqing, XIONG Tao, et al. Construction and application of road icing forecast model based on C4.5 decision tree algorithm[J]. Transportation Research, 2018, 4(1): 57. DOI: 10. 16503/j. cnki. 2095 - 9931. 2018. 01. 009
- [90] TOMS B, BASARA J B, HONG Yang. Usage of existing meteorological data networks for parameterized road ice formation modeling [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2017, 56(7): 1959. DOI: 10. 1175/JAMC - D - 16 - 0199. 1
- [91] LI Jian. A combination of DE and SVM with feature selection for road icing forecast [C]//Proceedings of the 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR 2010). Wuhan: CAR, 2010: 509. DOI: 10. 1109/CAR. 2010. 5456610
- [92] YANG Enhui, YANG Qinlong, LI Jie, et al. Establishment of icing prediction model of asphalt pavement based on support vector regression algorithm and Bayesian optimization [J]. Construction and Building Materials, 2022, 351: 128955. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2022. 128955
- [93] ZHAO Jie, ZHANG Huaixun, ZOU Hongliang, et al. Probability prediction method of transmission line icing fault based on adaptive relevance vector machine [J]. Energy Reports, 2022(8): 1568. DOI: 10. 1016/j. egypt. 2022. 02. 018
- [94] HE Lifu, LUO Jing, ZHOU Xiudong. A novel deep learning model for transmission line icing thickness prediction [C]//IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. New York: IEEE, 2021: 733. DOI: 10. 1109/IAEAC50856. 2021. 9390825
- [95] SUN Wei, WANG Caifei. Staged icing forecasting of power transmission lines based on icing cycle and improved extreme learning machine[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 1384. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2018. 10. 197
- [96] WANG Weijun, ZHAO Dan, FAN Ligu, et al. Study on icing prediction of power transmission lines based on ensemble empirical mode decomposition and feature selection optimized extreme learning machine [J]. Energies, 2019, 12: 21. DOI: 10. 3390/EN12112163
- [97] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学与理论与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2
 KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2
- [98] ENEVOLDSEN P, JACOBSON M. Data investigation of installed and output power densities of onshore and offshore wind turbines worldwide [J]. Energy for Sustainable Development, 2021, 60: 40. DOI: 10. 1016/j. esd. 2020. 11. 004
- [99] KNOBBE-ESCHEN H, STEMBERG J, ABDELLAOUI K, et al. Numerical and experimental investigations of wind-turbine blade aerodynamics in the presence of ice accretion [C]//AIAA Scitech 2019 Forum. 2019. DOI: 10. 2514/6. 2019 - 0805
- [100] JIN Jiayi, VIRK M S. Study of ice accretion and icing effects on aerodynamic characteristics of DU96 wind turbine blade profile [J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 160: 119. DOI: 10. 1016/j. coldregions. 2019. 01. 011
- [101] 李彬, 郭杰, 王峰. 超疏水材料在风机叶片防冰领域应用前景展望[J]. 河南电力, 2021(增刊1): 71
 LI Bin, GUO Jie, WANG Feng. Prospect of application of superhydrophobic materials in the field of anti-icing of wind turbine blades [J]. Henan Electric Power, 2021(Sup. 1): 71
- [102] PARENT O, ILINCA A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: critical review [J]. Cold Regions Science & Technology, 2011, 65(1): 88. DOI: 10. 1016/j. coldregions. 2010. 01. 005
- [103] 舒立春, 戚家浩, 胡琴, 等. 风机叶片电加热防冰模型及分区防冰方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1448
 SHU Lichun, QI Jiahao, HU Qin, et al. Anti-icing model and sectionalized anti-icing method by electrical heating for wind turbine blades [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1448. DOI: 10. 13334/j. 0258 - 8013. psee. 160154
- [104] POTAPCZUK G M. Aircraft icing research at NASA glenn research center [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2): 260. DOI: 10. 1061/(ASCE)AS. 1943 - 5525. 0000322
- [105] CAO Yihua, CHEN Ke, SHERIDAN J. Flowfield simulation and aerodynamic performance analysis of complex iced airfoils with hybrid multi-block grid [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal, 2008, 222(G3): 417. DOI: 10. 1243/09544100JAERO286
- [106] VALAREZO W O, LYNCH F T, MCGHEE R J. Aerodynamic performance effects due to small leading-edge ice (roughness) on wings and tails [J]. Journal of Aircraft, 1993, 30(6): 807
- [107] CEBECI T. Effect of ice on airfoil stall at high Reynolds numbers [J]. AIAA Journal, 1995, 33(7): 1351
- [108] VUKITS T. Overview and risk assessment of icing for transport category aircraft and components [C]//40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. 2002: 811
- [109] 于庆芳. Y12 - II 型飞机结冰对其飞行特性影响的试飞研究 [J]. 飞行力学, 1995(2): 63
 YU Qingfang. Flying test research of the icing and its effects on flight performance for Y12-II aircraft [J]. Flight Dynamics, 1995(2): 63

- [110] VENKATARAMANI K, PLYBON R, HOLM R, et al. Aircraft engine icing mode[C]//Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. [S.l.]: AIAA, 2008: 440
- [111] 李哲, 徐浩军, 薛源, 等. 结冰对飞机飞行安全的影响机制与防护研究[J]. 飞行力学, 2016, 34(4): 10. DOI:10.13645/j.cnki.f.d.20160422.004
LI Zhe, XU Haojun, XUE Yuan, et al. Research on flight safety effect mechanism and protection for aircraft icing[J]. Flight Mechanics, 2016, 34(4): 10. DOI: 10.13645/j.cnki.f.d.20160422.004
- [112] 丁军亮, 赵利利, 杨涛, 等. 自然结冰飞行试验技术综述[J]. 航空学报, 2023, 44(17): 50
DING Junliang, ZHAO Lili, YANG Tao, et al. Flight test technology of natural icing[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(17): 50
- [113] POTAPCZUK M G. Aircraft icing research at NASA glenn research center[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 26(2): 260. DOI: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000322
- [114] LI Shaoning, CARACOGLIA L. Wind tunnel experimental variability of aerodynamic loads for wind turbine blades[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1452: 012054. DOI: 10.1088/1742-6596/1452/1/012054
- [115] GAO Linyue, TAO Tao, LIU Yongqian. A field study of ice accretion and its effects on the power production of utility-scale wind turbines[J]. Renewable Energy, 2020: 167. DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.014
- [116] BEAUGENDRE H, MORENCY F, HABASHI W G. FENSAP-ICE's three-dimensional in-flight ice accretion module: ICE3D[J]. Journal of Aircraft, 2003, 40: 239
- [117] HEDDE T, GUFFOND D. ONERA three-dimensional icing model[J]. AIAA J, 1995, 33: 1038
- [118] GENT R. A combined water droplet trajectory and ice accretion prediction program for aerofoils[J]. Royal Aerospace Establishment, Technical Report, 1990: 90054
- [119] YIRTICI O, OZGEN S, TUNCER I H. Predictions of ice formations on wind turbine blades and power production losses due to icing[J]. Wind Energy, 2019, 22(7): 845. DOI: 10.1002/we.2333
- [120] STRAUSS L, SERAFIN S, DORNINGER M. Skill and potential economic value of forecasts of ice accretion on wind turbines[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020, 59: 1. DOI: 10.1175/JAMC-D-20-0025.1
- [121] FENG Chao, PAPACHRISTOU C. Grey-model based ice prediction sensor system on wind turbine system[C]//IEEE National Aerospace and Electronics Conference(NAECON). Dayton:[s.n.], 2012: 78
- [122] MESSINGER B L. Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1953, 20: 29
- [123] MYERS T G, HAMMOND D W. Ice and water film growth from incoming supercooled droplets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1999, 42: 2233
- [124] OTTA S P, ROTHMAYER A P. A simple boundary-layer water film model for aircraft Icing[C]//Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. [S.l.]: AIAA, 2007: 8
- [125] SHAD A, SHERIF S A. Numerical modeling of atmospheric rime ice accretion on an airfoil using an Eulerian approach[J]. Journal of Fluids Engineering, 2022, 144(6): 061112. DOI: 10.1115/1.4054048
- [126] DAI Hao, ZHU Chunling, ZHAO Huanyu, et al. A new ice accretion model for aircraft icing based on phase-field method[J]. Applied Sciences, 2021, 11(12): 5693. DOI: 10.3390/app11125693
- [127] DAI Hao, ZHU Chengxiang, ZHAO Ning, et al. An unsteady model for aircraft icing based on tightly-coupled method and phase-field method[J]. Aerospace, 2021, 8(12): 373. DOI: 10.3390/aerospace8120373
- [128] ZHAO Guoqing, ZHAO Qijun, CHEN Xi. New 3-D ice accretion method of hovering rotor including effects of centrifugal force[J]. Aerospace Science and Technology, 2016: 48. DOI: 10.1016/j.ast.2015.10.018
- [129] BROUWERS E W, JOSE L P, EDWARD C S, et al. The experimental investigation of a rotor hover icing model with shedding[J]. American Helicopter Society 66th Annual Forum, 2010: 1863
- [130] RAUSA A, MORELLI M, GUARDONE A. A novel method for robust and efficient prediction of ice shedding from rotorcraft blades[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2021, 391: 113452. DOI: 10.1016/j.cam.2021.113452
- [131] STRIJHAK S, RYAZANOV D, KOSHELEV K, et al. Neural network prediction for ice shapes on airfoils using icefoam simulations[J]. Aerospace, 2022, 9(2): 96. DOI: 10.3390/aerospace9020096
- [132] YI Xian, WANG Qiang, CHAI Congcong, et al. Prediction model of aircraft icing based on deep neural network[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(4): 535. DOI: 10.16356/j.1005-1120.2021.04.001
- [133] 屈经国, 彭博, 易贤, 等. 基于深度神经网络的任意翼型结冰预测方法[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(7): 48
QU Jingguo, PENG Bo, YI Xian, et al. Icing prediction method for arbitrary airfoil using deep neural networks[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2023, 41(7): 48
- [134] KREUTZ M, ALLA A A, VARASTEHE K, et al. Machine learning-based icing prediction on wind turbines[J]. Procedia CIRP, 2019, 81(4): 423. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.073
- [135] KREUTZ M, ALLA A A, VARASTEHE K, et al. Convolutional neural network with dual inputs for time series ice prediction on rotor blades of wind turbines[J]. Procedia CIRP, 2021, 104: 446. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.075
- [136] KREUTZ M, ALLA A A, LÜTTJEN M, et al. Ice prediction for wind turbine rotor blades with time series data and a deep learning approach[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 206: 103741. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103741
- [137] ZHANG Zhiqiang, FAN Bin, LIU Yong, et al. Rapid warning of wind turbine blade icing based on MIV-tSNE-RNN[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(12): 5453. DOI: 10.1007/s12206-021-1116-9
- [138] LI Yuanyuan, HOU Lingyu, TANG Ming, et al. Prediction of wind turbine blades icing based on feature selection and 1D-CNN-SBiGRU[J]. Multimedia Tools and Applications, 2022, 81: 4365. DOI: 10.1007/s11042-021-11700-7