DOI:10.11918/202508071

结冰特性动态感知与定量探测技术研究现状与展望

石 含[1],宋孟杰[1],桂 康[2,3],邵苛苛[1],葛俊锋[2,3],李 岩[4],王 飞[5],
徐志强[6],王 俊[6],张 旋[1],张 龙[1]

(1.北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081;2.多谱信息智能处理技术全国重点实验室(华中科技大学),
武汉 430074;3.华中科技大学 人工智能与自动化学院,武汉 430074;4.东北农业大学 工程学院,哈尔滨 150030;
5.青岛海尔空调器有限总公司,山东 青岛 266100;6.武汉航空仪表有限责任公司,武汉 430000)

摘 要:结冰现象在工业界与自然界中广泛存在,且常引发设备故障、交通隐患等各类不利影响。本文系统梳理了既有结冰探测技术的分类、原理及发展趋势,针对冰的声学、光学、热学、电学、力学5类物理特性分类,横向对比各特性下接触式与非接触式结冰探测传感器的探测范围与精度指标。分析结果表明:声学法和光学法接触式探冰技术适用于微米至毫米尺度冰层或水膜探测,最高可实现8 μm厚度分辨率,可满足飞行器表面0.3 mm冰层探测需求;冰内微尺度气泡与卤水通道引发显著的散射与干涉等会降低厚度探测精度,但同时为冰型区分提供了可量化的声学辨识基础;热学法接触式探冰技术通过监测冻结瞬间的潜热释放或冰体热阻和热容变化来实现,但难以精确区分毫米级厚度差异及不同冰型;电学法与机械法接触式结冰探测技术可稳定实现0.1~0.3 mm冰层厚度的探测精度,风洞实验表明,其可分辨0.06~0.45 mm的冰层,并已广泛用于飞行器、道路等结冰监测;对于风电叶片、输电线路等厘米级冰厚非接触实时监测需求,多采用探测精度1~10 mm的摄像式结冰探测技术;极地科考与航海运输所需的米级海冰探测,则依托空间分辨率达1 m且具备冰水区分、冰厚动态反演能力的微波及激光雷达遥感技术,以提供关键安全保障数据。进一步凝练了既有方法在多方案耦合精度提升与智能算法泛化能力增强方面的优化路径,为空天飞行器、寒区电网及海上风电等关键基础设施的冰灾防控提供理论支撑与实践路径。未来,结冰探测技术将借助声、光、热、电、力等多模态传感技术融合,实现冰型、冰厚、结冰面积等多参数高精度动态探测。

关键词:结冰特性;结冰类型;动态探测;厚度测量;多模态传感
中图分类号:TB69 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0195-34

Status and prospects of dynamic sensing and quantitative detection technologies for icing characteristics

Shi Han[1], Song Mengjie[1], Gui Kang[2,3], Shao Keke[1], Ge Junfeng[2,3], Li Yan[4], Wang Fei[5],
Xu Zhiqiang[6], Wang Jun[6], Zhang Xuan[1], Zhang Long[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. National Key Laboratory of Multispectral Information Intelligent Processing Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 5. Qingdao Haier Air Conditioner Co., Ltd., Qingdao 266100, Shandong, China; 6. Wuhan Aviation Instrument Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Ice formation is widespread in industrial and natural environments and often causes various adverse effects such as equipment failures and traffic hazards. This paper systematically reviewed the classification, principles, and development trends of existing ice detection technologies, and horizontally compared the detection ranges and accuracy indicators of contact and non-contact ice detection sensors under each property based on the classification of five physical properties of ice, namely, acoustics, optics, thermology, electricity, and mechanics. The analysis results show that acoustic and optical contact ice detection technologies are applicable to the detection of ice layers or water films at the micrometer to millimeter scale, achieving a maximum thickness resolution of 8 μm, which can meet the detection requirements of 0.3 mm ice layers on aircraft surfaces. Significant scattering and interference induced by micro-scale bubbles and brine channels within ice reduce the thickness detection

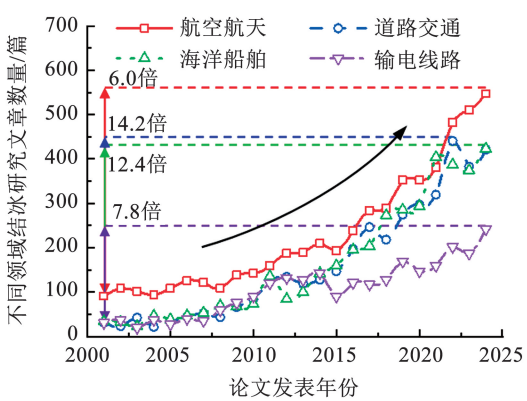
收稿日期:2025-08-30;**录用日期**:2025-09-18;**网络首发日期**:2025-10-28
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20251028.1134.002
基金项目:河北省科学技术厅2024年度燕赵黄金台聚才计划骨干人才(科技平台)项目(244A7625D);北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会科技支撑项目(Z231100006123010);国家自然科学基金面上项目(52576006)
作者简介:石 含(2000—),男,博士研究生;宋孟杰(1984—),男,教授,博士生导师
通信作者:宋孟杰,mengjie.song@bit.edu.cn

accuracy, but simultaneously provide a quantifiable acoustic identification basis for ice type differentiation. Thermal contact ice detection technologies achieve detection by monitoring the latent heat release at the moment of freezing or the changes in thermal resistance and heat capacity of the ice body, but it is difficult to precisely distinguish millimeter-level thickness differences and different ice types. Electrical and mechanical contact ice detection technologies can stably achieve an ice layer thickness detection accuracy of 0.1–0.3 mm; wind tunnel experiments show that they can distinguish ice layers of 0.06–0.45 mm, and they have been widely used in ice monitoring of aircraft and roads. For the non-contact real-time monitoring requirements of centimeter-level ice thickness on wind turbine blades and transmission lines, camera-based ice detection technologies with a detection accuracy of 1–10 mm are mostly adopted. The meter-level sea ice detection required for polar scientific expeditions and maritime transportation relies on microwave and LiDAR remote sensing technologies with a spatial resolution of 1 m and the capabilities of ice-water differentiation and dynamic inversion of ice thickness, providing key safety guarantee data. Furthermore, the optimization paths of existing methods in improving the coupling accuracy of multiple schemes and enhancing the generalization ability of intelligent algorithms were further refined, providing theoretical support and practical paths for the prevention and control of ice disasters in key infrastructure such as aerospace vehicles, cold region power grids, and offshore wind power. In the future, ice detection technologies will integrate multimodal sensing technologies such as acoustic, optical, thermal, electrical, and mechanical sensing to achieve high-precision dynamic detection of multiple parameters, including ice type, ice thickness, and ice area.

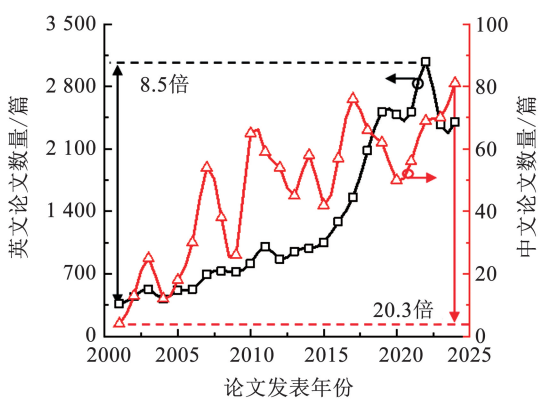
Keywords: icing characteristic; ice type; dynamic detection; thickness measurement; multimodal sensing

结冰现象广泛存在于航空航天、能源电力、交通运输等领域,设备表面覆冰常带来不利影响[1-3]。飞行器翼面结冰会导致其空气动力学特性改变,升力减小、阻力增加,飞行器的飞行性能降低可达50%[4]。风力发电机在沿海或高海拔低气压地区也会因叶片表面结冰而效率降低,甚至损坏。输电与通信线路会因覆冰断裂造成电力中断,覆冰也会导致信号塔倾倒,甚至造成人员伤亡。道路运输、海洋运输等交通领域也会因结冰发生危险事故[5-6]。海洋船舶及极地科考中的结冰灾害呈现出“裂隙隐匿致陷、甲板冰载致稳性失稳、旋翼微冰致升力骤减”三重耦合风险,其隐蔽性与瞬时链式破坏机理对人员安全与装备可靠性构成致命威胁[7-9]。不同领域对结冰特性研究的论文发表数量变化如图1(a)所示。该数据反映了结冰研究逐渐成为各工程领域的研究热点。为从源头遏制结冰诱发的不利影响,构建科学高效的除冰抑冰技术体系是核心路径,而研发高灵敏度、高精度与实时响应性的结冰探测技术,是其核心前提与关键支撑。

面对极端气候频发与装备复杂化趋势,传统“定时除冰”或“经验判断”已无法满足高可靠、低能耗、智能化的运行需求。实时、准确地获知结冰位置、厚度、类型及生长速率,是实现按需除冰、优化能量管理、延长设备寿命、保障人身安全的先决条件[10]。结冰探测技术已成为新一代飞行器适航认证、智能电网韧性提升、可再生能源高效利用的关键共性技术,其研究水平直接关系到国家重大基础设施的安全与经济运行[11]。如图1(b)所示,结冰探测技术相关中英论文发表数量逐渐递增,映射出极端气候条件下结冰灾害日益突出的现实威胁,也标志着结冰探测技术已从边缘课题跃升为中国航空航天、风电、电网等领域的共性关键技术,并获得了持续增加的研究投入与政策关注。



(a) 不同领域结冰特性研究论文数量逐年变化



(b) 结冰探测研究论文逐年变化

图 1 结冰危害及结冰探测技术研究论文数量

Fig. 1 Number of research papers on ice hazards and ice detection technologies

结冰探测的本质是对冰的特性进行探测，从物理学角度可将冰的特性分为声学、光学、热学、电学及力学 5 种[12-14]。声学上，利用冰-水-空气的显著声阻抗差异、冰层-基底/空气界面反/折射特性可实现结冰状态与厚度监测[15]；基于冰的光学特性进行结冰探测原理与声学相似，基于冰-水-空气对不同频率光波的反射率、散射系数、吸收系数等特性差异构建时域-频域分析反演实现结冰探测[16]；热学上，冰的导热系数约为水的 4 倍，热容约为水的 1/2，水冻结成冰时会释放约 334 kJ/kg 相变潜热，因此，通过监测上述热学特性差异判断是否结冰，结合热阻、热容分析也有望实现冰厚的精准探测[17]；电学上，特定频率段下冰和水的介电常数和电导率差异显著，结合时频特性分析可在探测结冰的基础上实现结冰类型、形貌的反演[18]；力学上，冰层附着导致结构体质量和刚度变化会引起其谐振频率偏移[19]。精确捕捉并解耦这些物理特性的变化，即可显著提升结冰探测的精度。

过去 50 年，结冰探测技术经历了从“点式-阈值”到“面式-成像”再到“多模态-智能”的跃迁[20]。早期航空领域依赖机械谐振式、压差式等单点传感器，仅输出“有无冰”的布尔量；1990 年代后，基于红外热像、光纤散射的分布式探测技术取得突破，并于 2010 年后陆续实现了毫米级分辨率的面结冰成像[21-22]；近 10 年来，电容层析、超声导波等多物理场融合方法相继问世，结合机器学习算法，可在复杂曲面、湍流边界层等极端环境下实时反演冰厚、冰型与冰密度[23-25]。此外，微机电系统（micro-electro-mechanical system，MEMS）微热阵列、柔性电子皮肤、无线无源声表面波标签等新器件的出现[26-28]，为大规模、低成本、自供电的结冰感知网络奠定了基础。本文总结了既有结冰探测技术原理，基于冰的声学、光学、热学、电学、力学 5 类物理特性分类将各类探测技术原理展示如图 2 所示。厘清了各结冰探测技术分支的探测本质，并为全文逐类剖析技术优势、瓶颈及优化路径提供了逻辑目录。

面对多物理场、多尺度、多学科交叉的结冰探测研究热潮，亟需系统梳理其物理机理、技术路径与优化趋势。本文以“声-光-热-电-力”5 大物理属性为主线，对近 20 年的结冰探测文献进行综述。首先，对比分析基于 5 大物理属性的结冰探测技术性能；其次，评估机器学习在信号增强、冰型识别与生长预测中的最新进展；最后，讨论极端环境适应性、标准化测试方法与未来智能化结冰感知网络的发展方向，以期为相关领域研究人员和工程技术人员提供全景式参考。

1　声学法结冰探测技术

声学法结冰探测技术通过检测冰层对声波的传播速度、信号衰减、反射频散特性等参数的影响识别结冰并估算厚度，具有灵敏到微米级薄冰、毫秒级响应、抗电磁干扰和适应复杂曲面等优点，但也存在多层界面建模复杂、冰型识别精度低、环境噪声干扰大及缺乏统一标准等共性问题。超声回波结冰探测技术常嵌入飞机机翼前缘、发动机进气口或风电叶片根部，对毫米级薄冰进行点测并实时触发除冰。声波导结冰探测技术利用埋入结构或贴敷的压电装置，获取飞机翼面等表面结冰分布与厚度信息。声呐式结冰探测技术常用于港口、海上风机基础或船体周围，实时扫描百米级水域的海冰厚度与分布，为冬季航行与海上作业提供预警。

1.1　超声回波式

超声回波结冰探测技术是一种利用超声波在介质中传播和反射特性的测量技术，通过发射超声脉冲并接收其在冰层与基体界面反射的回波信号，依据回波时间差和超声波在冰中的传播速度，精确测量冰层厚度[30]。Hansman[31] 及 Kirby[32] 早在 1985 年便于麻省理工学院开展了超声回波冰厚探测实验研究，对霜冰和釉冰中频率为 10 MHz 的超声波传输速度进行了精确测量，结果分别为 3.59 mm/μs 和 3.78 mm/μs。运用此技术能够实现 1.5 ~ 31 mm 冰厚探测精度小于 0.5 mm。基于上述数据，Hansman 等得出超声波传输速度对于冰的类型呈现出不敏感特性的结论。对此，Liu 等[33] 提出通过超声波传输的衰减特性进行冰型的识别，根据 5 ~ 15 MHz 频率范围内超声波在冰层中的衰减特性可实现霜冰和釉冰的高辨识度区分。Zhou 等[34] 提出并设计了一种以现场可编程门阵列（field-programmable gate array，FPGA）为核心处理单元的多通道、高分辨率脉冲回波无线检测系统，可实现对薄至 1 mm 冰层的精准识别。Wang 等[35] 构建了等效珠状粗糙度多层膜模型，基于此模型的超声脉冲回波冰厚探测技术，可实现对 0.14 mm 厚薄冰的精准识别，同时能够测量 11.6 ~ 120 μm 范围内的冰层表面粗糙度。

冰上附着水膜是结冰探测中不可避免的情况，水膜的存在会导致超声回波冰厚探测精度下降。Liu 等[36] 提出利用超声脉冲回波（ultrasonic pulse echo，UPE）技术测量冰层上附着的超薄水膜厚度的方法，在 20 ~ 100 mm 静止水体平均厚度的验证实验中，最大标准误差始终低于 5 μm，且成功验证了该技术在 10 m/s 风速下对厚度低于 1 mm 的超薄水膜的探测能力。Wang 等[37] 引入多层模型分析超声波在冰水过渡区的传输特性，进一步将冰上水膜厚度测量分辨率提升至 5 μm。

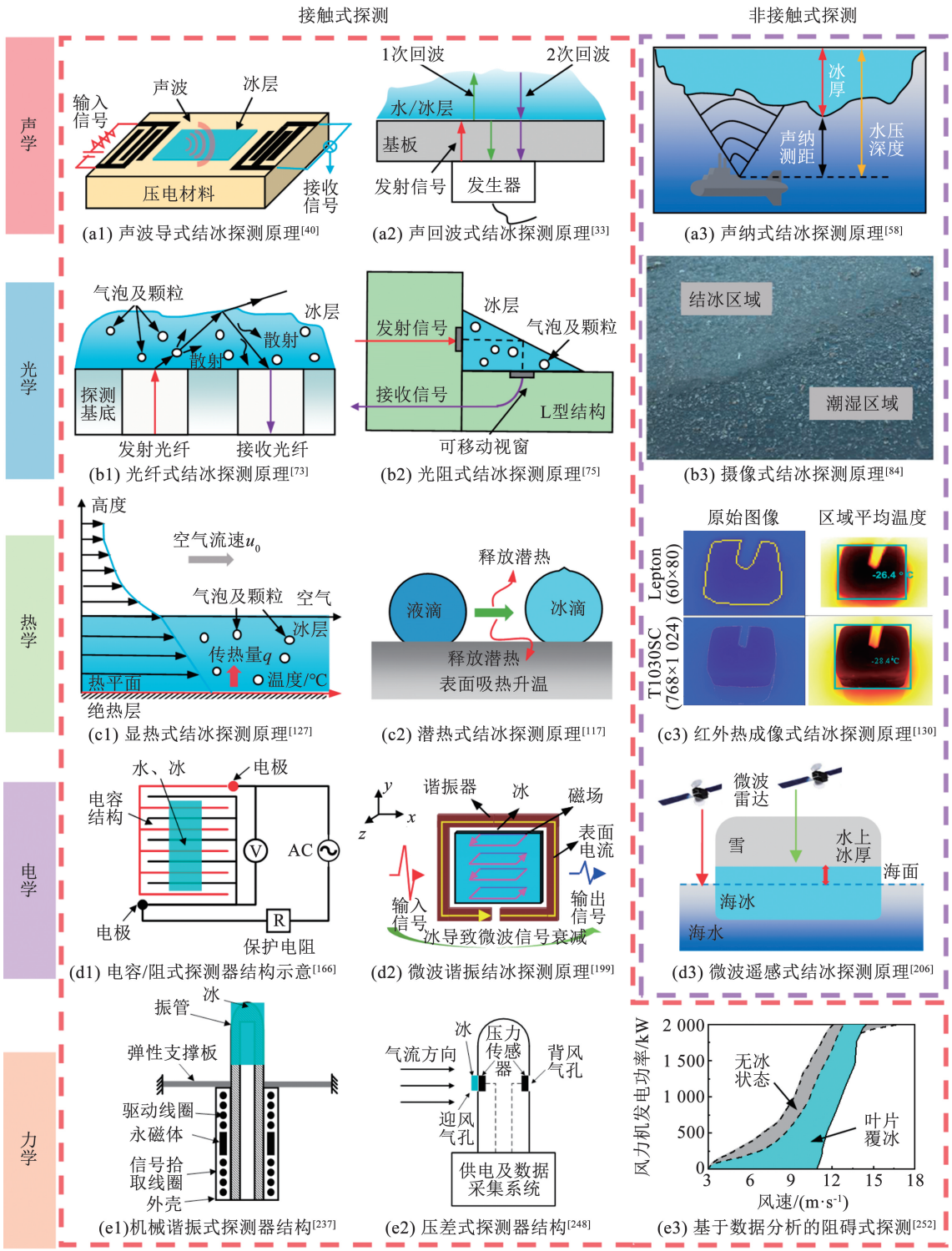


图 2　基于不同物理特性的结冰探测技术原理图及分类

Fig. 2　Schematic diagram and classification of ice detection technologies based on different physical characteristics

在已有研究的基础上，Zhang 等[29]进一步分析了不同厚度水膜、冰层及冰水混合物对 UPE 信号强度和传输时间的影响，如图 3 所示。基于端到端深度神经网络，对混叠超声回波进行直接解耦，实现不同回波的高保真分离，从而将液膜测量的死区压缩至 30 μm，并显著提升厚度测量的精度与鲁棒性。Gui 等[38]通过动态小波指纹（dynamic wavelet fingerprint，DWFP）实现了霜冰孔隙率的高精度测量，孔隙度测量均方根误差（root mean square error，RMSE）可低至 1.144%，这一结果为基于超声回波技术的冰型识别提供了有力支持。Ge 等[39]提出了一种基于 DWFP 和机器学习的实时探冰方法，可实

现结冰动态过程全周期的冰型识别，准确率达 87.8%。超声回波结冰探测器易实现探头的微型化与阵列化，适用于多数结冰探测场景。且由于其对光照、云雾等环境不敏感，可满足飞机、风电等复杂场景结冰探测需求。但传感器探头与结构表面必须紧密贴合，接触面黏合剂老化将会严重影响探测结果。环境温度波动、冰层表面粗糙度及内部气泡含量均会显著降低探测精度。然而，通过建立温度-声速补偿模型，采用粗糙度、空气含量自适应阈值修正，可提升传感器对冰型的精细辨识能力。

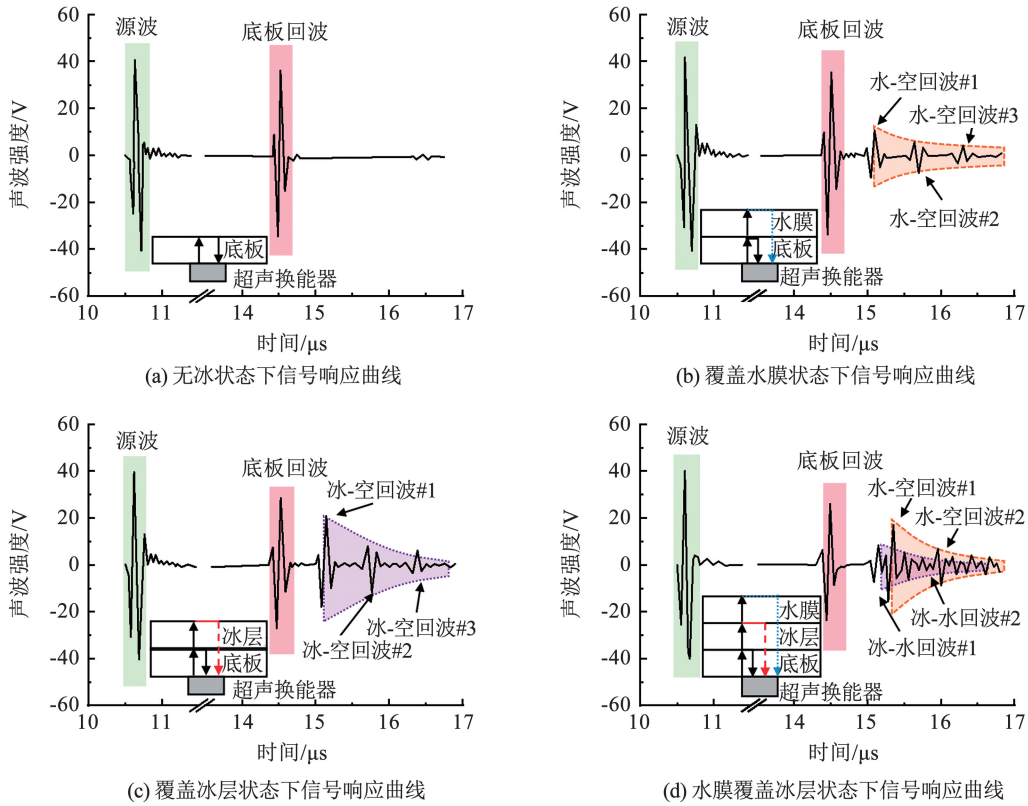


图 3　结冰和覆水状态下超声脉冲回波结冰探测实验结果[29]

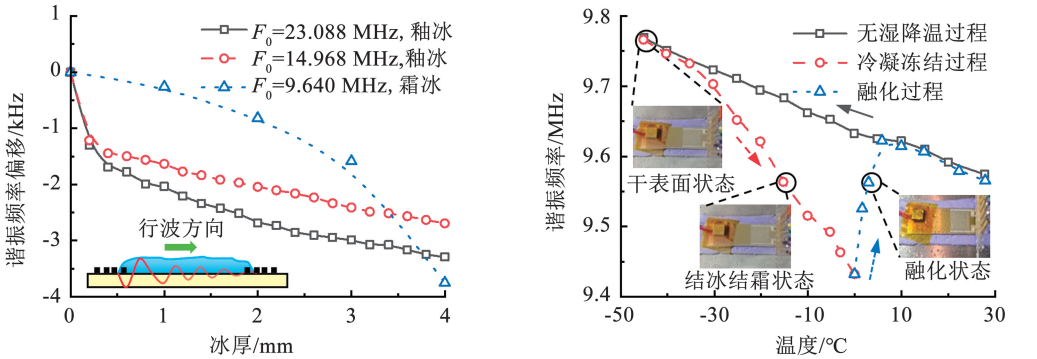
Fig. 3　Experimental results of ice detection by ultrasonic pulse echo under ice and water-covered conditions[29]

1.2　声波导式

声波导式结冰探测技术是一种基于声波在不同介质中传播特性变化的先进结冰检测方法。由于冰层的非均匀分布及厚度薄等特征，既有声波导结冰探测技术主要采用声表面波（surface acoustic wave，SAW）和声板波。两类模态的机械能高度集中在结构表面或表面附近的 1 ~2 个波长范围内，表面附着冰层对其相位和幅值的扰动尤为显著。通过监测声波信号在传播过程中的传输时间、相位和衰减等特性变化，可实现对结冰状态的实时监测[15]。Zeng 等[40]研究了环境温湿度、结冰、结霜等对 SAW 传导的影响，总结出结冰厚度与声波谐振频率的数学关系，如图 4（a）所示，从理论到实验证明了 SAW 装置检测结冰厚度和类型等特性参数的可行性，并研究了结霜、融霜过程对装置谐振频率的影响，如图 4（b）所示。当冰厚从 0 mm 逐渐增加至 4 mm 过程中，声波的谐振频率单调降低，因此，可构建冰厚与谐振频率的一一映射关系以实现结冰厚度的探测。

除声波谐振频率识别，通过声波传输的延迟和衰减程度也可以实现结冰情况探测[41]。Gao 等[42]首先在铝板表面探究了冰厚和冰型对水平剪切（shear-horizontal，SH）波传输速度的影响，可识别到 2 mm 铝板表面 1 mm 结冰。鉴于风力机和飞机表面材料的多层结构，Shoja 等[43]和 Maio 等[24]在多层复合板中实验证明了通过波导探测冰厚的可行性。Lamb 波是板导波结冰探测的最佳选择之一，其 B1 模态时间延迟会随着冰厚增加而线性减小；水仅对 Lamb 波 A0 模态产生影响，对 S0 模态影响不大[15]。基于 Lamb 波对冰水状态及冰厚的高敏感度，Mendig 等[44]将 Lamb 波用于飞机蒙皮材料构建了冰厚对波速影响的数学关系，证明了超声波导结冰探测技术用于飞机表面结冰探测的有效性。Zhang 等[45]采用了 B1 模式的 Lamb 波在表面传输的延时时间（time of delay，ToD）判断表面结冰状态。在实验中，B1 模式 Lamb 波的传输速度随着冰厚的增加单调减小，也证明了该方法 1 ~4 mm 范围内 1 mm

分辨率检测结冰厚度的可行性。为了在探测是否结冰的基础上获取准确的结冰位置，诸多学者通过构建超声波导传感阵列，引入机器学习处理超声波导数据，实现了表面结冰区域二维成像[25,46-47]。但冰与水同时存在时的高精度探测是超声波导结冰探测领域的一项重大挑战，众多学者已就此展开深入研究[48]。Smirnov 等[49]研究了水膜动态冻结对 SH 波和 Lamb 波传输速度和信号衰减的影响。Jiménez 等[50]对比了不同分类方法对超声波导数据的处理结果，不同方法耦合下结冰情况判断平均准确率为 89.98%。受限于表面结构的多层异质性与形态多样性，声表面波与声板波结冰厚度探测的鲁棒性较低，其独特优势在于具备高分辨阵列成像能力[41]。张晏鑫等[47]以及 Zhou 等[46]均提出了采用阵列布置超声换能器结合概率重构算法实现最大误差小于 10.3% 的结冰位置和结冰面积探测。声波导式结冰探测兼具长距分布式感知与结构共形的优势，可在复杂曲面实现毫米级冰层连续监测；然其精度受导波色散-衰减耦合与界面多重散射限制，且低温环境下波导-基底黏附退化及界面脱黏显著削弱长期可靠性。



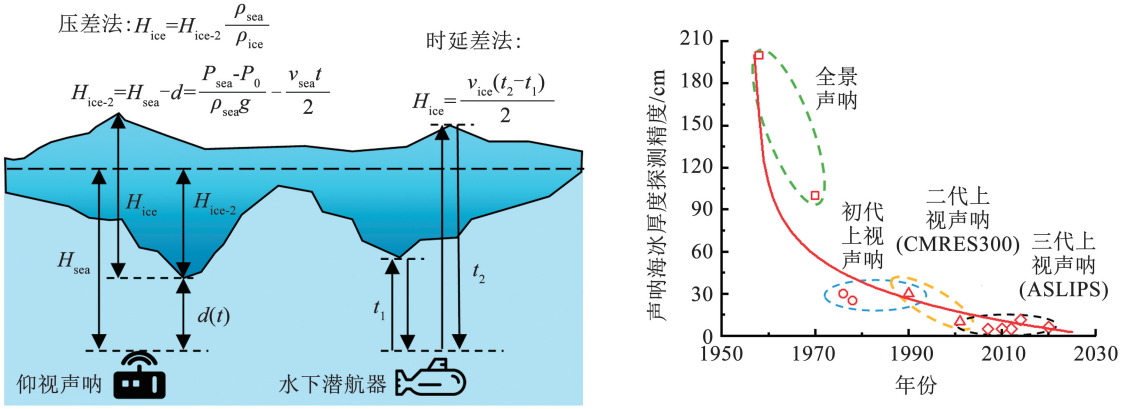
(a) 不同基频传感器因结冰导致的频率偏移　(b) 9.64 MHz传感器表面结霜融霜过程频率变化

图 4　结冰对声表面波结冰探测传感器的影响[40]

Fig. 4　Effect of icing on surface acoustic wave ice detection sensors [40]

1.3　声呐式

声呐结冰探测技术通过向冰层发射脉冲声波，测量其在冰/水界面和冰/空气界面的反射回波时间差，如图 5(a)所示，结合声波在冰中的传播速度，实现冰层厚度的非接触式实时监测[51]。该技术本质上属于超声回波式结冰探测技术，独特之处在于声呐通常置于水中，可在距冰层一定距离处进行非接触探测[62]。基于声呐的不同结冰探测传感器代表型号如图 5(b)和表 1 所示。鹦鹉螺号潜艇于 1958 年第一次通过舰艇内的全景声呐进行了北极海冰厚度探测，1970 年皇后鱼号潜艇以相同航线探测北极海冰厚度变化[52-53]。由于当时声呐技术发展不充分，海水温度、冰中裂隙、冰中盐水袋等对声波传播的影响尚未被充分考虑，探测误差达 2 m。



(a) 声呐海冰厚度探测系统示意　(b) 海冰探测声呐设备发展趋势

图 5　声呐式结冰探测技术原理及探测精度

Fig. 5　Principle and detection accuracy of sonar-based ice detection technology

表 1　典型声呐式结冰探测传感器及探测精度

Tab. 1　Typical sonar-based ice detection sensors and detection accuracy

序号	方法	代表型号	冰厚探测精度/cm	声呐探测范围/m
1	全景声呐	美国,皇后鱼号潜艇,全景声呐	100 ~ 200	30
2	初代上视声呐	加拿大,英属哥伦比亚大学,自研	25 ~ 30	30
3	二代上视声呐	挪威,CMR 研究所,ES300	10 ~ 30	150
4	三代上视声呐	加拿大,ASL 环境科学公司,IPS4/5	5 ~ 10	175

除舰艇声呐外，Hudson[54]于20 世纪 70 年代首次成功将独立的窄波束上视声呐(upward-looking sonar,ULS)设备用于海冰探测,该设备被安置在加拿大波弗特海的 30 m 深海底连续 250 d 监测海冰厚度变化。该上视声呐连续 10 a 监测了加拿大波弗特海的海冰厚度变化情况,冰厚探测精度为 25 cm。此后,Christian Michelsen Research(CMR)[55]和悉尼 ASL 环境科学公司[56-57]分别开发了针对北极海冰厚度探测的 ULS 传感器 ES300 和 IPS4/5,理论上可于海底 150 m 处测量海冰厚度,精度达 5 ~ 30 cm。

根据历史资料,海冰中声波传递速度一般为 3 700 ~ 3 900 m/s,冯常慧等[58]在哈尔滨工程大学混响实验室的水池中进行了仰视声呐冰厚探测试验,62 cm 冰厚监测中误差为 3.98 ~ 6.51 cm,冰中声速为 3 670 m/s。这是因为在海冰形成过程中,冰体内部嵌有的盐水袋、冰晶与裂隙等异质结构,致使声波在冰中的传播速度产生改变。即便声速出现微小变化,也可能致使声呐法冰厚测量出现显著偏差。为了提高声呐法冰厚探测精度,Lucieer 等[59]通过高密度的脉冲声波信号进行结冰探测,分析冰体的声学后向散射参数构建了冰体结构模型,可实现精度为 1 cm 的冰厚探测,并能够识别出 10 ~ 100 m 尺度冰体中 20 cm 尺寸的盐水袋等异质结构。Bassett 等[60]通过数学模型系统解析了冰体的声学散射特性,并构建了 35 ~ 155 kHz 宽带声呐结冰探测技术以提升冰厚探测精度。鉴于冰体中的气泡与裂隙对不同频率声波的传输速度影响存在差异,45 ~ 155 kHz 范围内的超声波因受气泡干扰较小,展现出相对更高的探测精度,从而在一定程度上抑制了冰中气泡对冰厚探测精度的负面影响。此外,针对冰晶状海冰声呐探测,Ghobrial 等[61-62]假设了冰晶的球状、椭球状、圆盘状声学后向散射模型,确定了圆盘状声学后向散射模型更加符合真实冰晶的声学特性,基于该模型及仰视声呐实现了河流中针状冰晶密度和尺寸的探测。水下声呐式结冰探测凭借冰水声阻抗差异显著、可远距离非接触获取冰厚及冰底形貌的优势,在极地冰水池、水库等场景实现米级尺度冰情监测。然而,受限于水体温盐-压力梯度导致的多途-频散耦合、冰层粗糙界面散射及低温换能器结霜,冰-水界面回波信噪比低、时空分辨率受限,且设备布放与数据回收困难,长期连续观测可靠性仍不足。

由表 2 部分声学法结冰探测研究可知,嵌入型超声回波与波导式传感器凭借高频声束与结构共形耦合,将探测面压缩至 225π cm^2 以下,并实现对 0.16 ~ 10 mm 薄冰的微米或毫米精度测量;非嵌入声呐系统则反向扩展至大尺度探测面,在 0.15 ~ 50 m 宏观尺度内以厘米级精度监测河道或极地冰层,无法解析毫米级冰层。嵌入式探测技术以牺牲量程换取分辨率,集中于飞机翼面与风电叶片微尺度结冰预警,非嵌入探测技术则以牺牲分辨率换取量程,服务于极地航运与河道冰情测绘。虽然 2018—2025 年嵌入式回波式冰厚探测精度由 0.5 mm 提升至 8 μm,2010—2020 年声呐式冰厚探测量程由 10 m 扩展至 50 m,反映小尺度高精度或大尺度宽量程技术路线并行优化,但是稳定冰型识别功能的实现将是未来跨尺度声学法结冰探测的关键方向。

表 2　声学法结冰探测技术研究对比

Tab. 2　Comparison of acoustic ice detection technologies

序号	探测方法	是否嵌入	探测面积	冰厚探测	探厚范围	探厚精度	冰型探测	应用场景	年份	文献
1	回波式	是	π cm^2	是	0.3 ~ 10 mm	0.3 mm	否	飞机翼面	2025	[30]
2		是	未提及	是	0 ~ 1.55 mm	0.14 mm	否	飞机翼面	2022	[35]
3		是	4.5 × 4.5 cm^2	是	0 ~ 160 μm	8 μm	否	飞机翼面	2022	[37]
4		是	未提及	是	0 ~ 4 mm	0.1 mm	否	飞机翼面	2025	[29]
5	波导式	是	未提及	是	0 ~ 4.0 mm	0.2 mm	是	风电叶片	2023	[40]
6		是	0 ~ 225π cm^2	否	—	—	否	飞机翼面	2018	[41]
7		是	0 ~ 10 × 10 cm^2	是	0.5 ~ 1.5 mm	0.5 mm	否	飞机翼面	2024	[45]
8		是	0 ~ 4 × 4 cm^2	是	0.5 ~ 1.5 mm	0.5 mm	否	飞机翼面	2024	[47]
9	声呐式	否	未提及	是	0 ~ 10 m	约 1 m	否	河道航运	2010	[51]
10		否	5 × 5 cm^2 1 × 1 m^2	是	1.3 ~ 8 m	1 cm	否	极地航运	2016	[59]
11		否	100π m^2	是	0.15 ~ 0.9 m	约 1 cm	否	极地航运	2020	[60]
12		否	2 × 2 m^2	是	0.3 ~ 50 m	5 cm	否	极地航运	2020	[63]

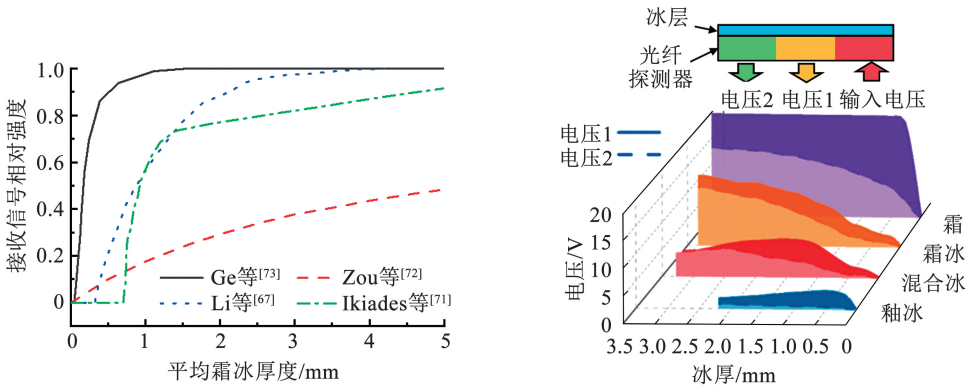
2 光学法结冰探测技术

光学法结冰探测技术利用冰层对特定波长光的反射率、散射强度或偏振态变化来识别结冰并反演厚度,具有毫秒级响应、高空间分辨率、可远程遥测和适用于透明/半透明表面等优点,但在强光背景、表面污染、水膜干扰下信噪比下降,存在薄冰-液态水区分难、低温光学元件漂移、校准环境苛刻等共性问题。光纤/光阻式结冰探测器可贴覆于机翼前缘或风电叶片,获取局部薄冰信息;摄像式常用于监测道路、湖面结冰状态,获取冰区分布图;激光雷达扫描结冰探测常用于风电叶片在线冰厚监测及河口、海冰大范围测绘。

2.1 光纤式

光学法结冰探测是一种基于冰和水的光学反射、散射、透射特性差异进行相态区分及厚度探测的方式[64],目前已被广泛应用于飞行器、风力发电机等领域。光纤式结冰探测传感器是一种典型的利用光学反射进行结冰探测的装置。黄昌尧等[65]设计了一款光纤式风力机叶片结冰探测系统,当冰厚超过 0.4 mm 时,可输出结冰状态报警。李薇等[66-67]设计了一种可实现 0.2 ~ 3.0 mm 透明冰厚度测量的同轴光纤结冰探测器,并发现冰体类型对实验结果的影响十分显著,会导致冰厚探测结果完全失效。但汉成等[68]在混凝土路面测试了同轴光纤式结冰探测传感器冰厚探测能力,实验结果与李薇等[66]测试的霜冰厚度影响趋势一致。为进一步优化光纤结冰探测器性能,许一飞等[69]设计了一种楔形探头结构,进一步扩大了冰厚探测范围,可实现 5 mm 内冰厚的测量,并通过结合一种对射式传感器和铂电阻温度传感器实现了冰型的区分,但冰型区分的准确率并未得到验证。

除结构优化外,增加接收光纤通道数量也可提高传感器探测范围及稳定性。闫泽豪等[70]设计了一款单路发射光纤、三路接收光纤式结冰探测器并应用于输电线路表面的结冰探测,通过多路接收通道降低了环境光对结冰探测结果的影响,理论上可实现 15 mm 内结冰厚度探测。Ikiades[71]则进一步将接收光纤增加至 6 路并对称分布在发射光纤两侧,通过 6 路接收光强的对比分析最终实现了兼具冰型识别功能 10 mm 范围内 0.5 mm 的冰厚探测精度。Ge 等[16]设计的光纤式结冰探测同时具有楔形探头结构和多个接收光纤,这一结构兼具了探测范围大和抗干扰能力强的优势,可实现 0 ~ 15 mm 冰厚和冰型的探测。Zou 等[72]则设计了具有双接收光纤的 V 形探头,通过实验证明了该结构在 0 ~ 10 mm范围内探测冰厚及冰型的可行性。此外,数据处理方法的引入将进一步提高传感器结冰探测的精度。上述不同优化类型的光纤式结冰探测器探测特性如图 6(a)所示,Zou 等[72]设计的传感器接收信号强度随霜冰厚度增加而缓慢增加,这一变化特性持续到冰厚超过 5 mm,适用于 0 ~ 20 mm 冰厚探测。Li 等[67]和 Ikiades[71]设计的传感器在 0 ~ 5 mm 具有较好冰厚探测能力,但二者均存在冰厚探测死点,无法探测到 0.3/0.7 mm 厚度以下冰层。Ge 等[73]通过将神经网络模型引入多接收光纤结冰探测器,在釉冰、混合冰、霜冰和霜等多结冰场景进行模型训练,结果如图 6(b)所示,4 种冰型识别准确率为 92.8%,冰厚测量均方根误差可达 0.27 mm。而多光谱的引入更加强化了光纤式结冰探测器状态区分的能力,可识别沙尘、油污等干扰状态,弥补了其不耐受脏污干扰的短板[74]。



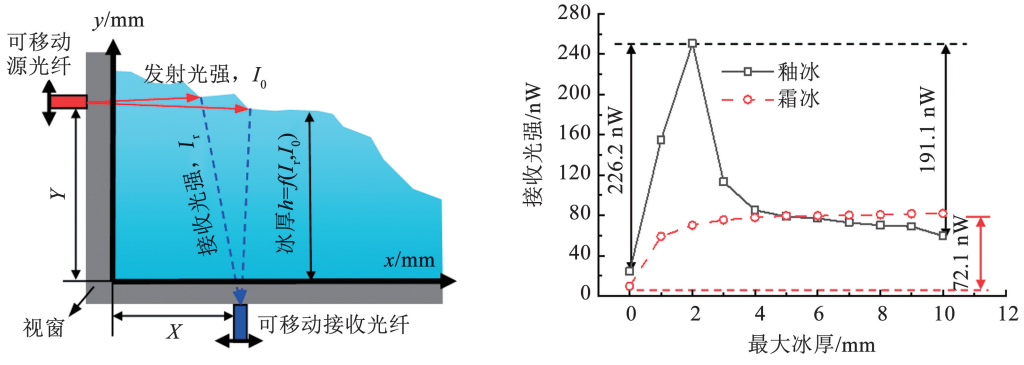
(a) 不同光纤式结冰探测器接收光强随冰厚变化 (b) 新型光纤结冰厚度探测曲线[73]

图 6 不同类型光纤式结冰传感器探测对比及基于神经网络的冰型探测结果

Fig. 6 Detection comparison of different types of fiber-optic ice detection sensors and ice type detection results based on neural network

2.2　光阻式

光阻式结冰探测技术通过分析冰和水等物质对光线传播的阻碍作用进行结冰特性探测。许一飞等[69]使用了一款对射式传感器进行冰雪厚度探测，在 10 cm 测量范围内冰厚探测精度可达 5 mm，但并未分析冰型、水膜等对实验结果的影响。Ikiades 等[75]设计了一种 L 形光阻碍式结冰探测器，如图 7 所示，其源光纤和接收光纤可灵活移动，通过定步长扫描可实现冰层形貌的测量。虽然其仅得出了固定光纤下霜冰 10 mm 内厚度测量结果，但这一思路对获取最大冰厚及冰层形貌具有重大参考价值。光路阻碍式结冰探测可实现毫米级冰厚高灵敏、瞬时响应的定量测量，且系统结构简单、易于微型化嵌入。然而，其可靠性受限于光源-探测器窗口的污染、结冰不均匀导致的光路偏折，以及低温凝霜/水滴造成的非冰散射干扰，长期野外运行中需频繁清洁与校准。



(a) 光阻式结冰探测技术原理　　(b) 冰厚对接收光强的影响

图 7　光阻式结冰传感器探测原理及厚度探测曲线[75]

Fig. 7　Detection principle and thickness detection curve of light-blocking ice detection sensor[75]

2.3　摄像式

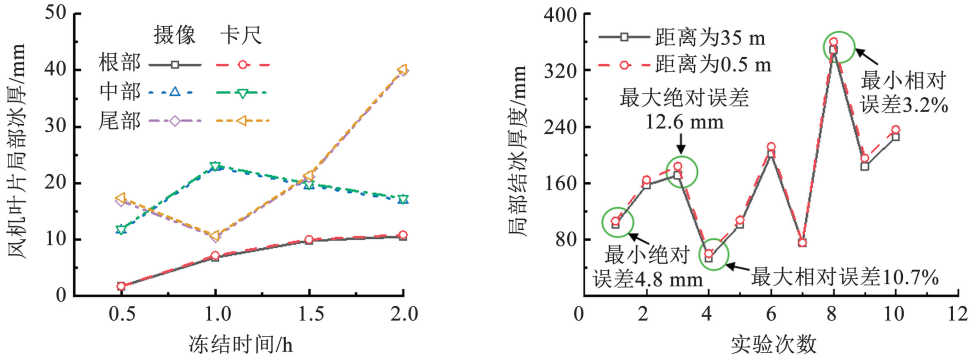
直接目测是人们最早观测结冰特性的方式，观测人员直接或间接获取被测位置是否发生结冰现象。直接目测式结冰探测最早用于飞机表面结冰探测，观测人员通过观测发光的探针表面覆冰情况判断飞机是否存在结冰风险。

摄像式结冰探测相较于直接目测简化了人工识别过程，通过相机或光电探测器获取待测位置发射光强等方式获取结冰范围及厚度等信息，常应用于道路桥梁[76-77]、能源运输[78-79]、电力通信[80-81]、极地科考[82-83]等领域。熊等[84]提出了一种基于可见/近红外结合神经网络的路面状态检测方法，利用网络模型训练光谱仪获取的路面可见光和近红外光拍摄数据，路面状态识别准确率可达 99.375%。基于摄像结果的路面状态识别准确率与图像数据库大小强相关，且路面的车辆行人等会影响拍摄结果，因此，该方式在工程应用中的探测准确率无法保障[85]。能源应用领域中摄像式结冰探测技术常用于空气源热泵或风力叶片的结冰监测[86-87]。Hu 等[88]提出基于边缘检测的风力叶片结冰厚度测量方法，利用高斯滤波、拉普拉斯边缘增强、Canny 边缘算法等方法处理图像，距离 0.5 m 下平均冰厚测量误差率低至 2.62%。Wei 等[89]则通过图像识别方法探测风力机叶片表面结冰体积，误差控制在 10% 以内。Kreutz 等[90]通过卷积神经网络模型进一步将基于图像识别的风力叶片结冰状态探测精度提高至(96 ±2)%。Dai 等[91]基于二维多重分形去趋势波动分析的分段算法处理电缆拍摄图像，平均冰厚探测精度为 90.6%。Hu 等[92]进一步通过 K-SVD算法处理图像，将理论精度提升至 0.05 mm。Ansari 等[93]将直接摄像式结冰探测技术应用于河流表面结冰区域探测，在 410 523 m^2河面的结冰区域平均探测误差仅 65 m^2。Wright 等[94]利用光学图像分析了北极海冰面积变化，虽然理论上精度可达 96%，但实际应用受图像质量、云雾遮挡等影响而导致探测结果失真。图 8 展示了边缘结冰检测图像处理流程，并将图像计算结果与卡尺测量结果进行了对比，在不同拍摄距离下误差率均小于 11%[88]。

偏振光成像结冰探测技术是一种基于直接摄像式技术的改进方案，偏振片可过滤杂波，且低光照条件不会影响偏振图像，以此来提升结冰探测的精准度[95]。顾昊等[96]和苑会珍等[97]在相机前设置了偏振片，在结冰路面下获取的偏振图像相较于无冰情况差异显著，证明了该方法有利于提高结冰探测性能。Yamada 等[98]从偏振图像中获取了路面的纹理信息，通过多元判别分析实现了路面积水、结冰等 5 类状态的判别，准确率达 92.3%。Nguyen 等[99]测试了偏振相机在夜间和恶劣天气下的路面状态识别能力，3 ~ 10 m 识别准确率在 90% 以上。



(a) 基于图像处理的风力叶片边缘结冰检测流程

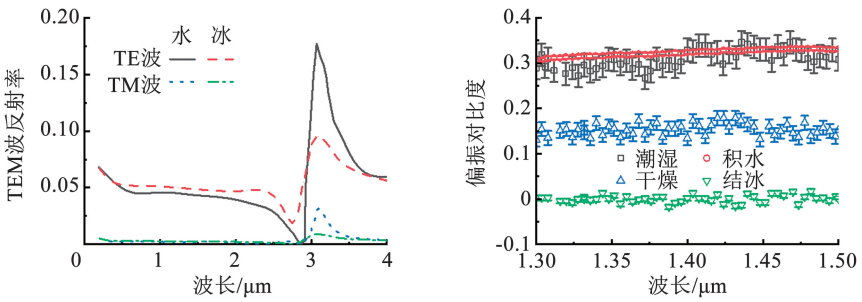


(b) 基于图像处理冰厚探测结果验证　　(c) 拍摄距离对冰厚探测结果的影响

图 8　基于图像处理的边缘结冰检测流程及冰厚探测精度[88]

Fig. 8　Image processing-based edge ice detection process and ice thickness detection accuracy[88]

一类摄像优化技术以特定波长光源进行拍摄，测得待测表面对应光的反射吸收特性，以抑制自然光源干扰[100]。冰和水对近红外光的吸收程度差异显著，如图 9 所示，因此，近红外光源用于结冰探测具有优势。张镇等[101]采用 940 nm 激光器作为光源进行了结冰探测，分析了不同入射角对接收光强的影响，证明了传感器任意安装角度下路面识别的能力。Casselgren 等[102]使用了多种不同波长光源进行探冰，两波长探测结果相互印证，对冰、雪、水的区分准确率达 90% 以上。Colace 等[103]发现基于单波长红外光对路面状态的区分准确率较低，采用了 2 ~ 4 μm 波长全光谱进行结冰状态监测，证明了光谱结冰探测的可行性。Grassi 等[104]甚至将 950 ~ 1 650 nm红外光用于食品中结冰监测，证明了该方法应用于食品检测的可行性。摄像式结冰探测技术因其结构简单、成本低廉且可直观呈现监测点覆冰形态而被广泛应用。然而，固定式摄像装置受限于单一视角，且在长期暴露于高湿、低温及强风等恶劣环境条件下，其光学元件与机械结构易受损，导致服役寿命显著缩短。尽管引入无人机航拍可在一定程度上扩展视场范围，但仍需依赖人工操控，难以实现完全自主监测。



(a) 冰和水的TEM波反射率　　(b) 不同路面状态下的偏振对比度

图 9　冰和水的近红外光反射率及偏振对比度随波长的变化[100]

Fig. 9　Variation in near-infrared reflectance and polarization contrast of ice and water with wavelength[100]

2.4　激光雷达式

激光雷达是一种发射脉冲激光以进行物质区分、测距、测厚等操作的设备，其相较于微波式合成孔径雷达(synthetic aperture radar，SAR)具有更高的分辨率和精度。表 3 展示了国外典型机载激光雷达技术指标。Hopkinson 等[105-106]在加拿大安大略省南部进行了研究，并利用机载 Optech ALTM 1210 和 ALTM 1225 LiDAR 传感器来绘制可变森林树冠下积雪深度的空间分布。第一个关于使用架站激光扫描仪测量雪深的重要记录工作是由 Jörg 等[107]于 2006 年提出的，在蒂罗尔阿尔卑斯山使用 Riegl LPM-i2K 来测量积雪深度。Kwok 等[108]首先对北极海冰上的积雪深度进行了航空激光雷达测量，并估计了不同误差源引入的不确定性。Lu 等[109]分析了

云气溶胶激光雷达 CALIOP 识别极地海冰、地表和开阔水域的能力。Liu 等[110]分析了云层等对光子计数激光雷达 ICESat-2 传输信号的影响，为提高激光雷达测距精度提供了参考。诸多学者针对云层厚度、云中液体含量[111]等对激光雷达的影响开展了研究，极大地提高了激光雷达探测精度。Lu 等[112]分析了海水对激光雷达衰减系数的影响，在沿海和海冰覆盖区域的平均衰减系数在 0.15 m^{-1} 以上。Landy 等[113]利用地面激光雷达测量海冰轮廓，理想情况可实现 1 cm 精度的海冰边缘探测。Várnai 等[114]分析了机载激光雷达测量雪和海冰厚度的潜力，通过激光数据反演海冰厚度测量误差可小于 10%。

表 3　国外典型机载激光雷达技术指标

Tab. 3　Technical specifications of typical international airborne LiDAR systems

型号	测量对象	技术	波长	检测深度	检测精度	方位角/(°)	网格密度
Hawkeye III(Leica)	海洋与陆地	多通道模拟探针	532 nm,1 064 nm,1 550 nm			40	0.8×0.8 m^2(海洋) 0.1×0.1 m^2(陆地)
CZMIL (Optech)	海洋与陆地	多通道模拟探针	532 nm,1 064 nm	0.15～50 m	0.36 m(50 m)	40	0.8×0.8 m^2(海洋) 0.3×0.3 m^2(陆地)
LADS HD (Fugro)	海洋	模拟探针	532 nm,1 064 nm			30	1.4×1.4 m^2(海洋)

表 4 对比了部分光学法结冰探测研究，其中光纤式与光阻式探冰技术以毫米级微尺度传感面直接嵌入线路电缆或飞机翼面，在 0～15 mm 厚度区间内实现 0.05～0.25 mm 的毫米精度，并可有效区分霜冰与釉冰；相比之下，摄像式与激光雷达探冰技术采用非接触式光学成像或飞行时间测量，在厘米至百米级宏观视场内进行毫米至米级精度的冰厚探测，有效覆盖极地航道、冰川冻土与风电叶片宏观冰情，但当前仍缺乏冰型辨识功能。未来光学结冰探测技术将在高稳定性、全冰型识别、亚毫米级冰厚探测 3 个方向同步优化，最终构建面向航空器、风力机组、输电线路及极地航运的全场景、高精度、智能冰情实时感知方法。

表 4　光学法结冰探测技术研究对比

Tab. 4　Comparison of optical ice detection technologies

序号	探测方法	是否嵌入	探测面积	冰厚探测	探厚范围	探厚精度	冰型探测	应用场景	年份	文献
1	光纤式	是	未提及	是	0～15 mm	约 0.25 mm	否	线路电缆	2016	[70]
2		是	0.2×1 mm^2	是	0～10 mm	未提及	是	飞机翼面	2023	[71]
3		是	7.6×2.8 mm^2	是	0～3.5 mm	0.05 mm	是	飞机翼面	2022	[73]
4	光阻式	是	0～5×5 mm^2	是	0～5 mm	约 0.5 mm	否	飞机翼面	2007	[75]
5	摄像式	否	0～0.115 km^2	否	—	—	否	极地航运	2020	[82]
6		否	未提及	是	0.5～4 m	8.9 mm	否	风电叶片	2021	[88]
7		否	未提及	是	0～13 mm	0.05 mm	否	线路电缆	2024	[91]
8	激光雷达	否	49π m^2	是	0～5 m	2～20 cm	否	极地航运	2020	[115]
9		否	π m^2	是	0～120 m	0.5 m	否	冰川冻土	2021	[116]

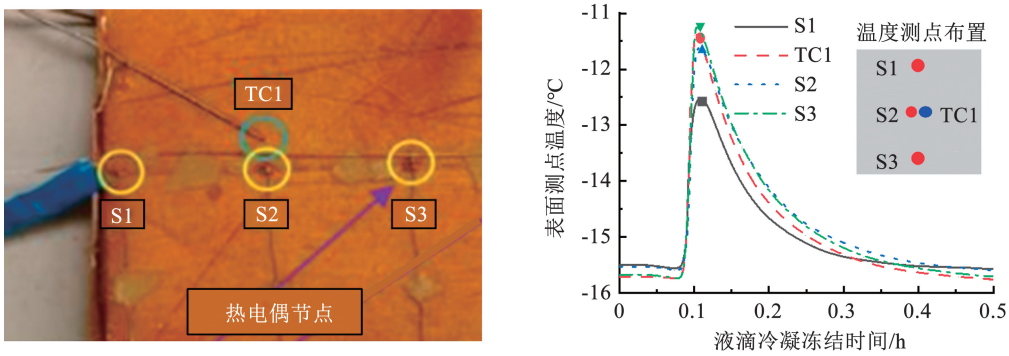
3　热学法结冰探测技术

热学法结冰探测技术基于冰的热力学特性，通过测量结冰过程中释放的潜热、表面温度变化或红外辐射差异来识别结冰并估算厚度，响应较快、可面域监测。但普遍存在环境温度干扰大、薄冰温差不明显、探测精度较低、表面发射率变化导致误判等共性问题。潜热式与显热式适用于飞机机翼、发动机进气口等局部嵌入式点测，红外热成像式则广泛用于风电叶片、输电线路、道路及航空器表面的大范围可视化结冰监测与预警。

3.1　潜热式

冷表面上水冻结成冰的过程伴随着大量潜热的释放，基于这一原理，Riehm 等[117]通过监测冻结瞬间潜热释放导致的探测表面温升现象进行结冰探测。实验室测试中，结冰导致的瞬间温升最大可达 2.7 ℃，这一温升可被捕捉但相较于热电偶 ±0.5 ℃ 的测量精度不够显著。Rieman 等[118]提出在探测表

面嵌入高精度热电偶阵列以测量结冰过程释放的高潜热进行结冰状态探测,在冷凝冻结过程发生的 20 s 内,可检测到(1.0 ± 0.1) ℃的温升,在 -16 ℃环境温度下,探测表面结冰时的局部温升可达 5 ℃。Guk 等[119]也通过嵌入热电偶阵列监测树脂板表面结冰情况,如图 10 所示,2 mm 厚树脂板面结冰过程的最大温升可达 11.9 ℃,并提出了基于温度变化速率判断冰厚的可能性。Gonzalez 等[120]创新地使用布拉格光栅测温光纤探测飞机翼面撞击液滴冻结引起的温升,通过小波变换等方式处理测量数据并充分利用了其高精度特性,可实现高敏感结冰探测。但光栅装置使用寿命短及抗干扰能力低的特性限制了该方法的广泛应用。Zhao 等[121]创新性地开发了一种木材冻融检测(living-wood freeze-thaw detection, LWFTD)传感器,通过液体含量探测器和基于相变潜热的冰水相界面探针得到茎干中的冰含量,并通过红外热成像验证这一方法的可行性。冰体融化或冻结的潜热量和冰量有关,但构建实测潜热量和冰厚的关系十分困难,至今并未有学者构建出具有普适性的潜热法冰厚探测关系式。



(a) 铜板表面热电偶布置 (b) 液滴冷凝冻结对铜板表面温度的影响

图 10 铜板表面液滴冻结阶段释放潜热对表面温度的影响[118]

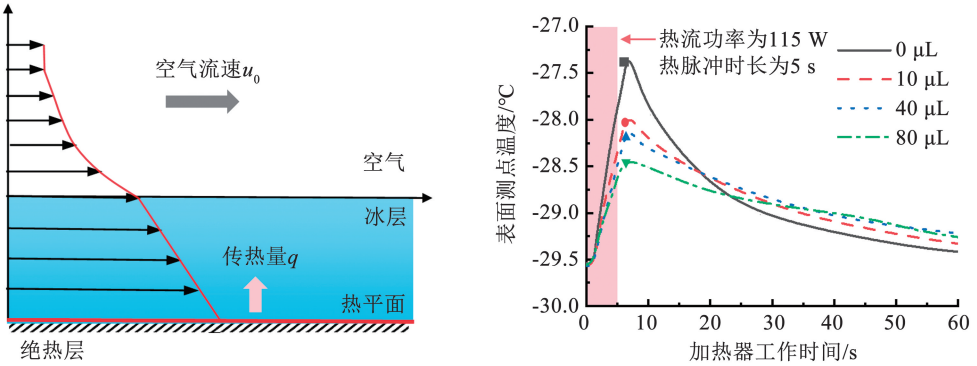
Fig. 10 Effect of latent heat released during freezing stage of droplets on surface temperature of copper plates[118]

飞行器常通过过冷大水滴(supercooled large droplet,SLD)气象结冰条件判断是否存在结冰风险,通过潜热法测量空气中总含水量(total water content,TWC)、液体含水量(liquid water content,LWC)以及冰水含量(ice water content,IWC)等。一种环境 TWC 测试方式是根据液滴或冰粒撞击热线传感器融化蒸发导致其功率变化来计算的。程刚[122]提出一种恒温热线式 SLD 探测方法,热线上附着过冷水滴或结冰会致使其保持恒温所需功率增加,该方案经过 C46 飞机上实测证明了其可行性。但热线的功率会受到环境温度、风速等影响,其工程应用可靠性难以保障。祁相莹等[123]设置了一组与测试热线风速、温度条件相同的对照热线,有效地排除了环境参数变化的影响。除恒温热线外,Nevzorov 锥体也是一种典型的测量环境 TWC 的装置。其通过锥体结构收集空气中的过冷水滴和冰粒,通过电阻加热装置功耗计算 TWC,与恒温热线测量结果的差异则为环境冰粒含量,其测量精度可达 80% ~ 90%[124]。Korolev 等[125]和 Lucke 等[126]针对冰粒撞击标准 Nevzorov 锥体易弹出优化了锥体结构,通过加大锥体深度使其检测性能提升超过 7%。潜热式结冰探测技术可在低温下快速识别结冰起始并估算冰量,且无需光学或声学耦合,结构简洁。然而,探测精度受环境温度梯度、对流换热系数波动及传感器热容滞后影响显著,难以区分薄冰与霜层,且长期运行需抑制表面热阻漂移与污染物热容干扰。因此,该技术适用于对结冰触发极为敏感的场景,辅以热补偿与自校准策略可一定程度满足实际结冰探测监测需求。

3.2 显热式

冰的积聚会引起物质热容与热阻的显著变化,从而有效阻碍热量传递,显热式结冰探测技术正是依据该原理发展而来。图 11 展示了显热式结冰探测原理示意,阐明了探测区域温度梯度的分布受结冰厚度的影响显著,可通过温度梯度的变化反映冰层厚度的变化。Zhang 等[127]提出在探测表面设置电加热膜,测试了电加热持续稳定供热时不同冰厚对热膜表面温度的影响,总结出冰厚探测拟合公式,0 ~ 300 m/s 风速下探测平均冰厚误差小于 10%。Tian 等[128]提出一种热时域反射测量冻土中的冰含量,通过实验证明了冰含量会影响冻土热容进而导致其温度响应速率下降,虽然这一方法探测精度及响应速度较低,但仍为冻土成分测量提供了一种新思路。Dongo 等[17]提出了一种热脉冲结冰探测方法,分析了结冰前后探测表面在热流脉冲下的温度变化差异,通过实验证明了采用该方法探测可以识别是否结冰。Liao 等[129]则创新地使用冰雪质量平衡仪(snow and ice mass balance apparatus,SIMBA)

测定南北极冰雪温度 SIMBA-ET，并通过设置 60 ~ 120 s 热量供应记录热脉冲下冰雪温度 SIMBA-HT，构建两组温差与冰的热容及冰厚的数学关系，实现冰厚的测量。在经过神经网络、小波分析和卡尔曼滤波结合处理后对约 200 cm 冰厚测量的平均偏差小于 5.64 cm。显热式结冰探测技术理论上可在复杂背景下实现冰厚毫米级反演，系统简单且易于阵列化。然而其精度受环境温度漂移、对冰型不敏感、对流换热系数非线性及基底热物性差异显著制约，持续加热亦带来额外能耗与局部融冰–再冻结风险。因此，该技术适合短时结冰厚度监测，引入自适应热补偿与低功耗脉冲策略可提高其精度与能效。



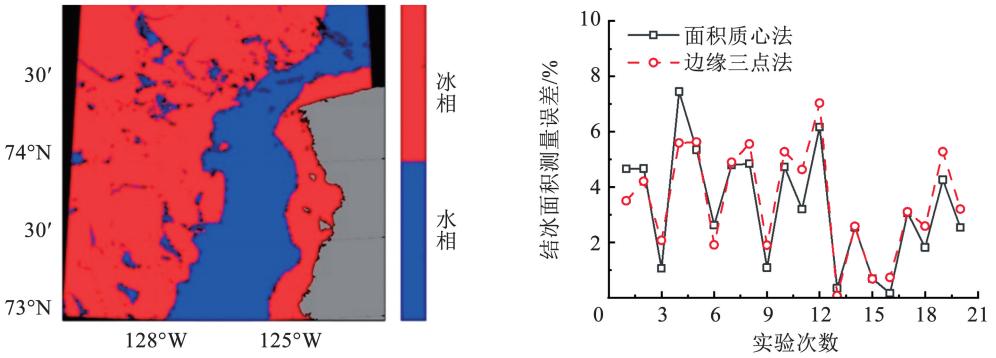
(a) 基于热脉冲结冰探测原理示意　　(b) 不同体积冰滴下探测表面温度变化

图 11　显热式结冰探测原理示意及结冰探测结果[127]

Fig. 11　Schematic diagram of sensible heat ice detection technology and ice detection results[127]

3.3　红外热成像式

红外热成像结冰探测技术利用冰和水之间的热学性质差异，通过红外热像仪捕捉物体表面的红外辐射，将其转化为温度数据，进而识别出结冰区域[130]。该技术无需主动红外光源，仅捕捉中波或长波红外光。Drüe 等[131]提出了一种基于中分辨率成像光谱仪传统开放水域算法（MODIS Potential Open Water Algorithm，MPA）处理热红外成像数据，与特殊传感器微波成像仪（special sensor microwave imager，SSM/I）通过被动微波数据计算的海冰密度差值不超过 10%。Ludwig 等[132]和 Willmes 等[133]也将 MPA 算法用于冰间流道及海冰密度探测。Ye 等[134]提出一种新型热红外海冰浓度算法（Thermal Infrared Ice Concentration Algorithm，TIRIA）对班克斯岛附近结冰面积进行探测，冰与海水的红外区分如图 12 所示。Arua 等卫星搭载中分辨率成像光谱仪（MODIS）是一种典型的红外热成像结冰探测设备，对海洋高精度结冰探测具有重要意义。MODIS 的光谱范围包含了近红外及中长波红外光，同时具有光反射及热辐射成像功能。针对 MODIS 获取的数据集，诸多学者提出归一化差水指数（normalized difference water index，NDWI）反演算法[135]、水–海–冰–云识别（open-water-sea-ice-cloud discrimination，OSCD）算法[136]、机器学习方法[137-138]等反演海冰或湖冰密度新方法以提高海冰浓度测量精度。Aqua 和 Terra 等卫星搭载了 MODIS，通过 0.4 ~ 14.4 μm 全光谱获取海冰信息[137,139]。Ludwig 等[140]提出将 MODIS 红外海冰探测及 AMSR2 微波海冰探测数据合并分析，合并后的海冰探测分析结果将优于任意单一分析结果。



(a) 班克斯岛周围红外探冰结果　　(b) 不同图像处理下结冰探测误差

图 12　班克斯岛近红外反射率分布及不同结冰面积算法对比[134,147]

Fig. 12　Distribution of near-infrared reflectance over Banks Island and comparison of different ice area algorithms[134,147]

基于红外成像的冰体轮廓识别是一个难题。Hao 等[141]通过主成分分析法(Principal Component Analysis,PCA)及 Canny 算法识别热红外成像冰体轮廓,对于圆形冰体尺寸探测精度小于 8%。Wang 等[142]利用有限元分析及模糊推理法建立了三维缺陷定量识别系统,提高了冰体三维探测的抗干扰能力。Li 等[143]通过假设冰体厚度数值计算冰体温度分布,并与红外成像结果校核修正假定厚度,直至数值计算结果与红外成像结果差异小于设定误差。该方法结冰厚度探测精度直接取决于设定误差,实验中最小误差可达 0.14%,但多次迭代的时间消耗导致该方法不适用于实时结冰探测场景。Tian 等[128]实验研究了红外热成像探冰技术圆柱表面冰厚探测能力,通过图形处理可将测量不确定度降低至 0.1 mm,这一结果为电缆、飞行器表面热红外探冰提供了参考。Madi 等[144]提出将红外热成像和直接摄像相结合,通过热学和光学图像分析圆柱表面结冰厚度的不确定度可低至 0.1 mm。Spar 公司开发了一款基于红外成像的飞机表面结冰探测系统,可识别厚度为 0.2 mm 的冰层[145]。为了进一步增加热红外结冰探测准确率,Muñoz 等[146]提出在风力机叶片表面附着一层铝膜,由于铝和冰的发射率相差一个数量级(0.05 和 0.97),铝膜表面结冰区域在红外成像中格外显著。经过 2 年的实际应用,铝板表面覆灰状态下仍可有效识别结冰现象。这一方法虽巧妙地凸显了热成像中的结冰现象,但覆膜无法用于对空气动力学性能要求严格的飞行器。周家纬等[147]对比了面积质心法与边缘三点法处理结冰探测红外图像的误差,如图 12(b)所示,基于面积质心法计算的结冰面积平均误差更小,仅为 3.302%。虽然红外结冰探测已被诸多学者广泛研究,但热成像需标定、信号处理系统复杂、设备造价较高也限制了其广泛应用。

表 5 对比了部分热学法结冰探测技术研究,显热与潜热式结冰探测技术以毫米级芯片嵌入为主,仅显热式与红外成像探测方法可识别 0 ~ 20 mm 冰厚,最高精度 0.16 mm,且均未实现冰型识别。热学法结冰探测的核心难题在于难以同时满足毫秒级响应与宽动态量程需求、复杂环境引起显著温漂以及单一热阻模型无法区分冰型。未来其将向着实时探测、高稳定性方向发展。

表 5 热学法结冰探测技术研究对比

Tab. 5 Comparison of thermal ice detection technologies

序号	探测方法	是否嵌入	探测面积	冰厚探测	探厚范围	探厚精度	探测冰型	应用场景	年份	文献
1	潜热式	是	$<1\ mm^2$	否	—	—	否	飞机翼面	2020	[118]
2	潜热式	是	$36\pi\ mm^2$	否	0 ~ 14 mm	—	否	风电叶片	2022	[126]
3	显热式	是	$<1\ mm^2$	是	0 ~ 13 mm	约 0.3 mm	否	风电叶片	2021	[127]
4	显热式	是	$0 \sim 45 \times 16\ mm^2$	否	—	—	否	冰川冻土	2024	[128]
5	红外成像	否	$3.8 \times 43\ cm^2$	是	0 ~ 20 mm	0.16 mm	否	飞机翼面	2017	[144]
6	红外成像	是	$<1\ mm^2$	否	—	—	否	风电叶片	2024	[17]
7	红外成像	否	$91 \times 59\ mm^2$	是	0 ~ 7 mm	<0.22 mm	否	交通道路	2022	[140]

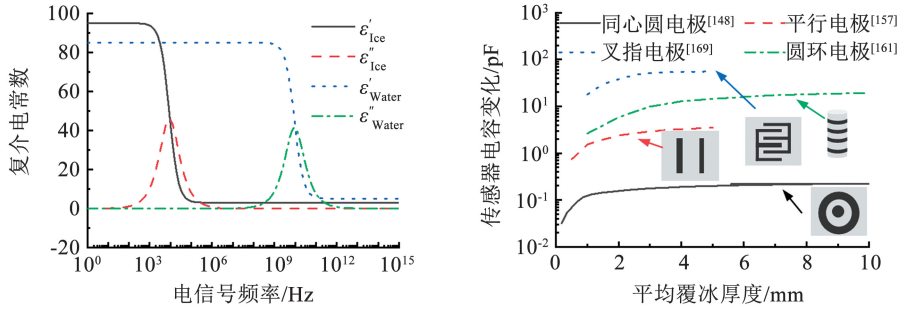
4 电学法结冰探测技术

电学法结冰探测技术基于冰与水在介电常数、电导率、磁导率等电磁学差异,把覆冰量转换为可测的电参量或遥感亮温变化,实现快响应、可面域或点测的结冰识别。然而该方法普遍存在温度漂移、水膜-薄冰信号重叠、传感器校准苛刻等难题。电容/电阻/谐振式传感器常用于飞机机翼前缘、风电叶片等实现定点毫米级薄冰报警;放射线式结冰探测技术常用于燃料电池内部剖面结冰密度测量;微波遥感式结冰探测器应用于卫星、海岸雷达等,扫描百米至千米级海冰、道路覆冰分布,为航行、除冰调度提供宏观数据。

4.1 电容式

电容式结冰探测技术主要基于冰、空气和水介电常数的差异来探测结冰信息[148-149]。冰和水的复介电常数在 $10^4 \sim 10^{10}$ Hz 范围内差异显著,如图 13(a)所示。其因结构简单、成本低、响应快等优点,可用于道路桥梁、航空航天、能源电力等多种场景的结冰监测。Zhu 等[150]通过研究冰层密度和温度对电容传感器的影响,得到了计算冰层介电常数的拟合公式,为电容式结冰探测器多场景应用提供重要参考。刘鹏飞等[151]提出基于电容效应的电缆覆冰检测技术,可实现电缆表面 3 ~ 15 cm 的冰厚测量。Dong 等[152]设计了一种基于电容检测的路况传感器,可区分道路表面干燥、潮湿及冰冻状态。Cho 等[153]提出一种用于原油管道表面结冰状态检测的叉指电容

结冰探测器，可以识别出冷凝水结冰的瞬间。Elzaidi 等[154]设计了不同纵横比电容探针阵列进行海冰检测，发现海冰厚度的增长会导致传感器电容单调变化，拓展了电容式结冰探测传感器的海冰探测应用场景。Flatscher 等[155]设计了一种平面电容检测装置，发现其工作电容会随霜和冰的积聚而变化，证明了其探测霜冰特性的潜力。Inanlu 等[156]则进一步将电容传感器应用于换热器表面结霜质量动态检测，结合摄像法霜厚识别，实现了结霜密度的动态测量。Rahman 等[157]和周翼等[158]提出了探除冰一体化电容式结冰探测器，具有 4 mm 范围的结冰探测及除冰功能，为结冰与防除冰领域提供了借鉴与参考。除冰水混合物探测外，电容式结冰探测器甚至可实现冰–水–油混合物探测。Altrabolsi 等[159]基于平面电容传感器，可以检测冰盖下石油深度及冰盖厚度，对 2 ~ 5 cm 厚度冰层测量误差小于 0.5 cm。电容式结冰探测技术在诸多场景的研究与应用极大拓展了其适应性，而电容式结冰传感技术的主要难题源于探测表面状态非均匀、混合相态、温度漂移及微形貌偏差等因素所诱发的厚度测量误差。基于弛豫极化效应的复阻抗谱结冰探测器可通过逆向分析混合相态与温度漂移的耦合效应，构建温漂自补偿机制并同步实现冰水界面的高分辨测量[160]。



(a)冰和水的复介电常数随频率的变化　　(b) 不同结构电容结冰探测器电容随冰厚变化

图 13　冰水介电差异及不同结构电容式结冰探测实验结果对比

Fig. 13　Dielectric difference between ice and water and comparison of experimental results of capacitive ice detection sensors with different structures

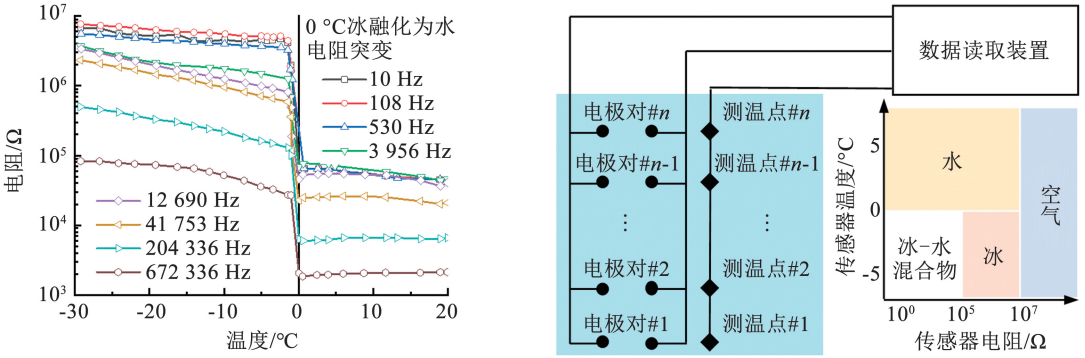
为了进一步提高各种电容结冰探测器的探测精度，诸多学者提出了环形阵列[154,161]、叉指阵列[23,162]等结构优化传感器探测精度及范围。Owusu 等[163]通过两个带电圆柱间因结冰引起的电容变化实现了结冰探测，证明了该方案探测云中冰的存在和冰增长速率的可行性。Gui 等[23,164]设计了一种柔性阵列式电容结冰探测膜，在 0 ~ 10 mm 探测范围内，冰水相界面高度测量及冰层厚度误差小于 0.21 mm。传感器结构优化提高了电容结冰探测器的测量精度及灵敏度，阵列式的布置形式结合信号分析算法也可实现冰层形貌测量这一实际需求，但微米尺度结冰探测的技术难题仍难以攻克。

神经网络[165-166]、机器学习[167]等数据处理方法的引入进一步提高了电容结冰探测技术精度。李泽军等[165]针对平面电容传感器提出了频率扫描方法以及神经网络模型提高了传感器冰厚探测精度，在 0 ~ 2 mm 冰厚范围内 97.7% 的测试数据误差小于 0.2 mm。Zheng 等[168]利用神经网络优化叉指电容结冰探测器，实现了 0 ~ 3.0 mm 冰厚探测误差小于 0.2 mm 的误差率为 92.4%。Jiang 等[167]将优化算法增强型神经网络模型与电容式结冰传感器数据相结合，使结冰状态探测准确率高达 98.8%。Gui 等[169]提出一种不依赖温度传感器的电容结冰探测器优化方法，可将传感器探测误差从 0.14 mm 降低至 0.09 mm。基于结构优化的电容结冰探测与高效数据处理模型相结合，将电容式结冰探测传感器最高探测精度提升至 90 μm。不同学者提出的电容结冰探测传感器如图 13(b)所示，Gui 等提出的叉指电极结构的电容变化对冰厚变化最敏感，结冰厚度探测精度更高。而蒋兴良等[161]提出的圆环电极结构兼具了宽量程及高敏感度特性，在电缆等圆柱体表面结冰探测具有最佳性能。电容式结冰探测技术实现百微米级冰层高分辨测量，具备结构轻薄、易阵列化与低功耗优势；然而其精度受环境湿度、基底介电特性漂移及电极表面污染显著干扰，长期稳定性受限，耦合温–湿自校准与防护涂层可提升长期结冰探测可靠性。

4.2　电阻式

电阻式结冰探测技术通过测量空气、水和冰的电导率差异判断结冰状态，一般不具有结冰厚度、类型等特性探测能力。Abdelaal 等[170]设计了一种柔性贴片结冰状态探测器，基于传感器测量的电阻值小于 470 kΩ 为水，大于 146 MΩ 为空气，否则为冰。然而冰的电阻并不是一个恒定值，会因温度、冰型等

发生变化。Abie 等[171]在 10 Hz ~672 kHz 频率范围内分析了冰和水电阻的显著差异,如图 14(a)所示,这一差异在不同电信号频率下始终显著存在。王瑞等[172-173]通过测量冰的电阻约 1 ~350 MΩ 而水的电阻一般小于 1 MΩ 进行冰水区分,通过设置等间距的电极对进行冰厚探测,当 N 组连续电极对检测到冰时,可计算得到冰厚为 N 个间距,在黄河实地应用时探冰精度约 2 cm。由于不同学者对冰和水区分电阻值的定义不同,仅通过电阻无法精确区分冰和水。Tabatabai 等[174]研究了基于温度-电阻探测混凝土表面结冰状态的多种情况,通过温度辅助可提高传感器区分冰水状态的准确性。分析了碎冰、混凝土结冰、橡胶污染等多种实际场景,拓展了电阻式结冰探测的可行性。图 14 (b)展示了温度-电阻冰厚探测技术原理,基于温度界限 0 ℃、冰水电阻界限约 10^5 Ω、冰-空气电阻界限约 10^7 Ω 可实现冰水状态的探测。通过等距设置电极对及温度测点也可实现冰厚探测。



(a) 不同频率和温度下冰和水的电阻差异　　(b) 电阻式结冰探测原理示意

图 14　冰和水的电阻差异及电阻式结冰探测原理[171]

Fig. 14　Difference in resistance between ice and water and schematic diagram of resistive ice detection technology[171]

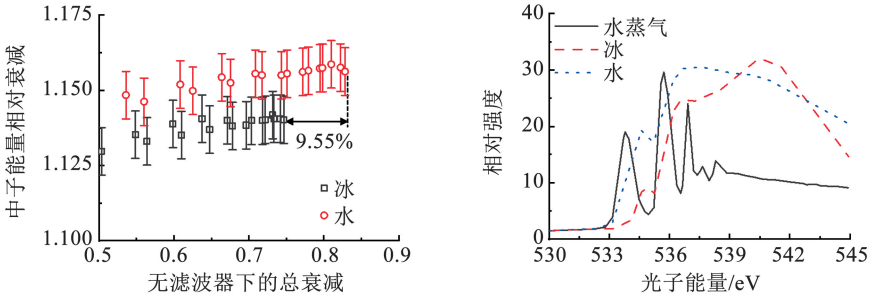
实际河冰或海冰中存在的异质结构会导致其电阻发生变化,造成结冰探测结果的偏差。Dongo 等[175]利用吸湿材料混合离子电子聚合物导体(mixed ionic-electronic polymer conductors, MIEC)测量机翼结冰状态。导体内吸湿材料中的吸附水形成冰晶而膨胀,会导致导体的电阻从约 22 kΩ 突升至约 39 kΩ,基于该现象可实现结冰状态探测。这一方法要求材料具备较高的吸湿性及变电阻特性,因此未被广泛使用。此外,一种电阻率层析成像技术被广泛用于冻土中水、冰等物质的探测。基于水、冰、泥土不同的电阻率,通过层析电阻实现电极间物质空间分布的可视化。Barsukov 等[176]利用瞬变磁场测量地基中的电阻率分布,并反演出地基中结晶形貌分布,这为地下冰晶、冰山融孔形貌探测提供参考。Jones 等[177]利用直流电阻率层析成像技术分析了南北极海冰结构变化,可区分钻孔井间薄冰和碎冰的类型,然而岩石等物质会被误判为冰导致成像精度的降低。Phillips 等[178]通过钻孔电阻率断层扫描技术分析了瑞士阿尔卑斯山东部 12 m 地下富含冰的岩石冰川内部物质分布,提出地层中物质电阻率低于 15 kΩ·m 为水体和含水量较高的淤泥,电阻率 60 kΩ·m 以上被认为冰体或岩石。因此,如何区分冰体和岩石等固体是提高基于电阻率探冰精度的关键。Kristensen 等[179]利用电阻率成像探测冻土中的冰层及水体时,证明了电阻率小于 200 Ω·m 为水体,大于 5 kΩ·m 为冰体,对于 0.2 ~5 kΩ·m 电阻率的物质则无法明显区分,岩石等非导电或弱导电物质会被误判为冰层。为了消除非导电物质被误判为冰,Mudler 等[180]提出通过高频电压进行电阻率层析,高频信号诱发冰的极化明显异于岩石等固体,提高了电阻率层析成像精度。该方法一定程度地排除了非导电物质对探测结果的影响,然而含水黏土等弱导电物质对电阻率层析成像的影响无法完全避免。电阻式结冰探测技术具备电路简单、成本低、响应快及易于微型化阵列部署等优势。但电极极化、基底表面污染及电解质迁移导致的电阻漂移易引入假冰信号,需引入自清洁电极与温度-污染协同校准策略方可兼顾精度与耐久性。

4.3　放射线式

20 世纪 Sunstrand 公司首次提出通过放射性粒子进行结冰探测,设计了一种 β 粒子结冰探针,基于探测路径上结冰对粒子的遮蔽程度进行结冰厚度探测。基于该原理的传感器可用于飞机结冰探测[181],但由于放射性同位素具有污染环境以及运输、贮存等方面的原因,目前已淘汰这种结冰传感器。X 射线衍射结冰探测一般用于微尺度冰晶探测,Kim 等[182]利用 X 射线衍射探测了真空环境下 150 K 以下厚度 2 ~50 μm 气相沉积冰的微观结构,

并与标准立方冰和六方冰对 X 射线的散射强度进行对比，微米尺度气相沉积冰是立方冰和六方冰的混合结构，并不趋于某一种特定分子结构，这种微尺度冰结构观测可为成核等微观理论研究提供支持。除了 X 射线衍射外，冰和液态水的 X 射线吸收光谱（X-ray absorption spectrum，XAS）也显示出重大差异，基于此，Myneni 等[183]实现了对水蒸气、固体冰及液态水的区分。Cavalleri 等[184]针对冰和水不同的 X 射线吸收光谱做了解释，将该现象的成因归于具有稳定四面体分子结构的冰融化成水后分子间形成的氢键。Kobayashi 等[185-186]将 X 射线计算机断层扫描技术用于冷冻食品中的冰晶探测，这对于食品冷藏运输提供了技术支撑。

脉冲中子成像原理与 X 射线成像相似，中子束透射冰体时被原子吸收、散射，造成接收中子束强度衰减进而识别是否结冰[188]。Biesdorf 等[187]发现冰和水对中子能量造成的相对衰减差异约为 1.6%，如图 15（a）所示。基于上述结论，Santamaria 和 Stahl 等[189-190]利用中子成像技术成功地检测到燃料电池低温下阴极侧通道出口区域较高的冰含量。这为保护燃料电池安全冷启动提供了一种可靠的监控方法。为了进一步提高中子成像结冰探测精度，Siegwart 等[191]提出了长波长与短波长的比值 α_{rel} 代替能量衰减系数进行冰水区分，冰和水的 α_{rel} 区分对比度可达 8%。此外，0.5 mm 厚度以上冰/水存在时的对比度噪声比大于 5，证明了该方法的强抗干扰能力。由于水膜或冰膜厚度的增加会导致中子射线能量衰减增加，这一现象理论上可用于冰厚探测。现有研究大多探究约 1 mm 厚度冰膜测量，过厚的冰膜会导致中子束无法穿透待测物，脉冲中子成像探冰范围受到限制。虽可使用中子通量更大的中子源实现高穿透性，但相应的系统成本及危险性会提升。



(a) 冰和水对中子能量的衰减作用　　(b) 冰和水对X射线强度的影响

图 15　水的不同相态对中子射线和 X 射线的影响[187]

Fig. 15　Effect of different phases of water on neutron beams and X-rays [187]

4.4　平面微波谐振式

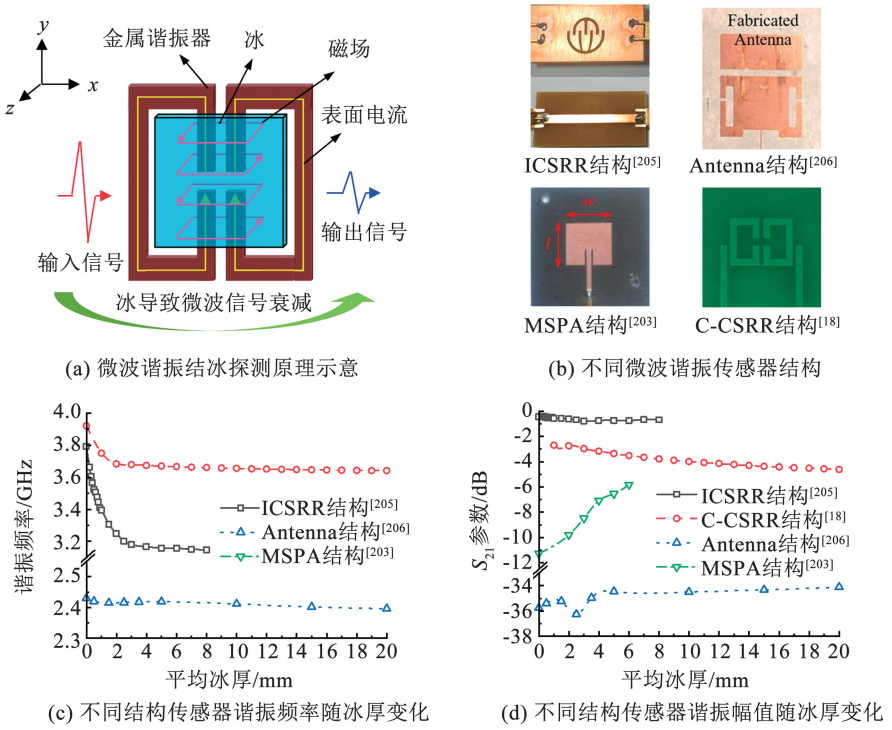
平面微波谐振式结冰探测技术是一种基于微波谐振原理的先进结冰监测手段。其核心在于利用平面微波谐振腔对冰层的敏感性，当冰层在监测表面形成时，会改变谐振腔的电磁特性。通过精确检测谐振频率、品质因数等微波参数的微小变化，可实现对冰层厚度及生长状态的高精度实时定量监测。

英属哥伦比亚大学 Zarifi 教授团队[192]发现液滴冷凝、结霜、结冰、融化现象对平面微波谐振器的谐振频率具有显著影响。基于此，深入研究了基于劈裂环谐振传感器及电/磁耦合平面微波谐振器的冰水状态识别、冰厚探测与海冰盐度识别技术[193-194]，实现对纯水和 5% 盐水结冰状态的精准监测，然而并未得出冰层厚度测量的定量数学关系。Shi 等[195-196]利用一种电容耦合劈裂环微波谐振传感器开展了水平冷表面去离子水和盐水冻结探测系列实验研究。去离子水冰厚及冰水相界面高度可在 17.0 mm 范围内被精确测量，平均误差小于 0.37 mm[197]。此外，盐水冰厚、盐水冰水相界面高度及冰体盐度也可在 0～20 mm 及 0～15.0% 范围被测量，精度均在 87.8% 以上[18,198]。

上述谐振微波传感器均注重于 1 cm^2 以下结冰面积的小尺寸结冰探测研究，为提高平面微波谐振器工程应用中有效探测面积，Shah 等[199]设计了一种劈裂环谐振器阵列，测量了约 5.8 km 高度 100 m/s 风速下飞机机翼表面混合相冰晶积聚情况。冰晶的积聚与融化会导致传感器谐振频率发生变化，基于此实现了冰晶存在状态判断及 11%～30% 融化程度的测量，然而冰晶积聚的厚度或质量未能被定量测量。Niksan 等[200]则将人工神经网络引入传感器阵列，将飞机翼面结冰、液滴附着状态识别准确率提升至 93.33%。进一步，Niknahad 等[201]提出使用平面微波谐振器进行非接触探测，在距离冰体 2 cm 仍可识别 2%～4% 盐度的 100 μL 盐水冰滴。Kozak 等[202]开发了一种 T 形槽贴片天线传感器，Wagih 等[203]开发一种射频识别贴片，均可将微波源设置

在约 10 m 外监测贴片表面结冰情况，准确率可达 80% 以上。这种方法虽然微波源是远离待测区域的，但是鉴别冰/水的装置仍然是贴片，本质上仍属于接触式的平面微波谐振技术，其优势在于微波源、波导线等装置不需要嵌入在探测平面内对探测面造成破坏。

图 16 展示了平面微波结冰探测器的工作原理，并对比了 4 款典型传感器结构及实验结果。4 种不同传感器的谐振频率与 S_{21} 参数均会随着结冰厚度的增加而单调变化。其中，Xie 等[204]设计的 ICSRR 传感器谐振频率对冰厚变化最敏感，但仅能探测 8 mm内结冰厚度。Tariq 等[205]设计的 MSPA 传感器主要通过 S_{21} 参数变化进行 0 ~ 6 mm 冰厚变化感知，其工作频率几乎不会随冰厚变化而变化，因此并未进行对比。Kozak 等[202]设计的 Antenna 传感器虽然具有 20 mm 的探测范围，但其敏感度相对较低。而 Shi 等[18]设计的 C-CSRR 传感器 S_{21} 参数能够在 20 mm 内单调变化，相较于其他 3 种传感器具有更大的探测范围。平面微波谐振式结冰探测技术可实现毫米级冰层高分辨测量，且对温度、光照不敏感，测量结果稳定性强。然而其精度受基底介电非均匀性、谐振器表面污染及耦合缝隙水汽凝结引起的频率漂移显著制约，长期稳定性与标定复杂性仍待解决。因此，该技术适用于航空、风电等复杂曲面短周期监测，引入环境自适应校准与防护涂层策略可拓展其稳定性及寿命。



(a) 微波谐振结冰探测原理示意　(b) 不同微波谐振传感器结构

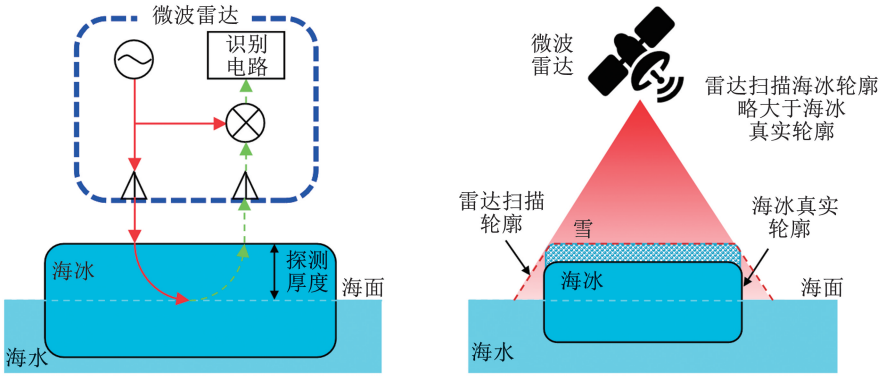
(c) 不同结构传感器谐振频率随冰厚变化　(d) 不同结构传感器谐振幅值随冰厚变化

图 16　平面微波谐振式结冰探测实验结果对比

Fig. 16　Comparison of experimental results for planar microwave resonance ice detection technology

4.5　微波遥感式

微波遥感结冰探测技术是一种先进的冰情监测手段，其利用冰层对微波辐射吸收、反射和散射作用产生的辐射亮度和散射信号，实现冰厚、冰型等特性参数的非接触探测，如图 17 所示。根据微波源不同，微波遥感式结冰探测技术分为主动式和被动式两种。主动式微波遥感技术通过雷达向海面发射和接收脉冲微波信号，根据信号的延迟与衰减可实现海冰类型识别、冰水区分、海冰厚度反演等功能。主动式结冰探测技术以星载合成孔径雷达为代表，其观测空间分辨率已达米级，可获得较为精细的极地海冰监测数据[206]。被动式微波遥感技术是通过卫星携带的微波辐射计等设备测量海面的自然微波辐射，对大面积海冰分布密度进行测量，其中，常用波段为 C 波段和 Ku 波段两种[207]。美国航天局(NASA)发射的 Nimbus 7、Aqua 卫星，日本发射的 GCOM-W1 卫星，以及中国开发的 FY-3 卫星等均搭载了微波辐射计或微波成像仪，被动式微波遥感传感器参数如表 6 所示。



(a) 基于微波遥感冰厚探测示意　　(b) 基于微波遥感海冰面积探测示意

图 17　主动式微波遥感式结冰厚度及面积探测原理示意

Fig. 17　Schematic diagram of principle of active microwave remote sensing for detecting ice thickness and area

表 6　被动微波遥感卫星参数[207,221]

Tab. 6　Passive microwave remote sensing satellite parameters[207,221]

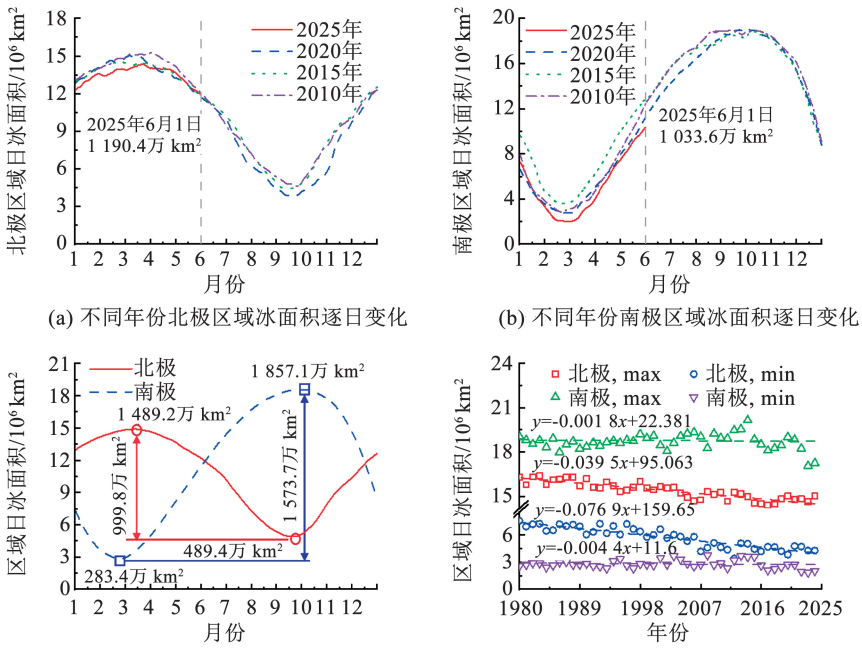
传感器	卫星平台	轨道高度/km	运行时间	频率/GHz	极化方式(H,V)	瞬间视场/(km×km)	亮温精度/K	分辨率/km
SMMR	Nimbus 7	955	1978.10—1987.08	6.6	H,V	136×89	0.7	30~156
				10.7	H,V	87×57	0.8	
				18	H,V	54×35	0.9	
				21	H,V	47×30	1.0	
				37	H,V	47×30	1.4	
SSM/I	DMSP	860	1987.07—2009.11	19.35	H,V	70×45	0.8	12.5~69
				22.24	V	60×40	0.8	
				37	H,V	38×30	0.6	
				85.5	H,V	16×14	1.1	
SSMIS	DMSP	833	2006.12 至今	19.35	H,V	70×45	—	12.5~75
				22.24	V	60×40	—	
				37	H,V	38×30	—	
				91.66	H,V	38×30	—	
AMSR-E	Aqua	705	2002.06—2011.10	6.93	H,V	75×43	0.3	4~75
				10.65	H,V	51×39	0.6	
				18.7	H,V	27×16	0.6	
				23.8	H,V	32×18	0.6	
				36.5	H,V	14×8	0.6	
				89	H,V	6×3	1.1	
AMSR2	GCOM-W1	699	2012.05 至今	6.93	H,V	62×35	—	3~62
				7.3	H,V	62×35	—	
				10.65	H,V	42×24	—	
				18.7	H,V	22×14	—	
				23.8	H,V	26×15	—	
				36.5	H,V	12×7	—	
				89	H,V	5×3	—	
MWRI	FY-3B/3C	836	2010.11 至今	10.65	H,V	51×85	0.5	12.5~85
				18.7	H,V	50×30	0.5	
				23.8	H,V	27×45	0.8	
				36.5	H,V	18×30	0.5	
				89	H,V	9×15	1.0	

主动式微波遥感海冰特性探测主要通过阈值处理[208-209]、边缘检测技术[208,210]、分类算法[211]、基于极化参数分类[212-213]、神经网络[214]等方法对微波遥感数据进行处理实现。Komarov 等[215-216]提出了自动海冰运动跟踪算法处理 SAR 数据进行海冰与开放水域的区分,并提出了自适应概率阈值正确分类海冰的比例为 88.2%。Karvonen 等[217]提出一种基于分割和局部合成孔径雷达信号强度的开放水域和海冰识别算法,对开放水域的定位精度约 90%。Lu 等[218]提出了一种基于随机森林模型的星载 C 波段 RADARSAT-2 全极化 SAR 图像的北极海冰和开放水域自动分类方法,总体海冰和海水分类准确率为 99.94%。Geldsetzer 等[219]提出通过垂直极化和水平极化的比值及共极化比来判断海冰是否发生融化。共极化比对海冰上的液态水极其敏感,基于该参数优化后的微波遥感探测海冰融化的天数与 Sentinel-2 卫星近红外光数据验证,总偏差仅 0.5 d。Munoz-Martin 等[220]提出了一种利用偏振全球导航卫星系统反射计估算海冰厚度的新方法,考虑了海冰盐度对海冰微波散射特性的影响,该模型结果与 CryoSat-2 海冰估算结果在 4 种工况下均方根误差均小于 1.1 m。

海水与海冰的微波发射率显著不同,因此可通过被动微波辐射计测量结果进行区分,被动微波遥感卫星技术参数对比见表 6。这些遥感卫星结冰探测的本质是利用冰和水在毫米波段的介电-辐射差异,被动测量亮度温度,并通过频率-极化组合与反演算法进行冰水区分甚至冰厚探测,亮温测量精度可达 0.3 K。由于一年冰和多年冰的差异并不显著,Lee 等[222]提出了根据不同频率通道之间的垂直偏振发射率差异区分一年冰和多年冰。10.65 ~ 36.5 GHz范围内的发射率谱分布与其他研究结果吻合较好,18.7 GHz 以下频段的发射率反演误差在 2% 以内。此外,偏振比、光谱梯度比以及交叉偏振比(cross-polarized gradient ratio,XPGR)等参数也被用于处理微波辐射数据,以削弱环境温度对测量结果的影响,提高探测精度。Makynen 等[223]提出了一种 AMSR2 薄冰检测算法,针对北冰洋 20 cm 厚度为界限的薄冰与厚冰进行分类,结果表明,厚冰被错划为薄冰的平均概率为 8.7%,反之为 37.0%。该方法的适用范围受限,仅可用于海冰密度大于等于 70% 及环境温度小于 5 ℃ 工况。Shokr 等[224]提出了加拿大环境冰浓度提取算法,根据遥感观测结果对不同厚度海冰进行分类,对于 10 cm 厚度以下的海冰密度识别误差小于 11.73%。被动遥感卫星自身不发射微波信号,仅依赖自然辐射,信号强度低。为提高其信噪比,系统延长了积分时间或扩大视场角,导致空间分辨率下降。此外,其设计以宽幅宏观探测为目标,而非局部细节成像,因此,在南北极海冰面积的大范围监测中更具有优势。而具有更高分辨率的主动遥感卫星受限于窄刈幅、高功耗及需要复杂校正等, 适用于高/中分辨率的局部精细探测场景。

冰盖上部覆雪是导致海冰分布密度及厚度测量精度难以提升的最主要因素之一,多孔隙雪的存在阻碍微波信号的传输。为了提高覆雪海冰厚度探测精度,Carret 等[225]提出了一种水上冰厚计算方法,通过 Mallett 方程计算平均积雪密度并设定冰的密度为 900 kg/m^3,将覆雪导致的冰厚测量平均误差降至 0.06 m。然而积雪密度并不是一个恒定值,导致了微波信号的受阻碍程度不同,通过 Mallett 方程拟合得到的覆雪密度为经验值,仍会导致部分冰厚探测结果存在较大偏差。此外,Abdalati 等[27]提出一种检测格陵兰岛冰盖表面融雪的 XPGR 算法,在 XPGR 为 -0.025 时可区分干雪和湿雪。然而,上述针对微波遥感卫星冰盖融雪检测方法适用于 40 GHz以下低频数据,在具有高空间分辨率的高频数据分析时精度较差。Wang 等[226-227]利用大津法(Otsu)对 AMSR2 辐射计 89 GHz 高频通道的微波数据进行处理,探测格陵兰岛冰盖表面融雪天数的精度最高可达 99.35%。Zhang 等[228]基于机器学习的分类方法对微波辐射计、微波成像仪等微波遥感设备获取的北极海冰微波数据进行处理,生成了 2002—2017 年每日海冰分类数据,对一年冰和多年冰的区分准确率达 93%。

基于微波遥感卫星获取的南北极海冰面积变化曲线如图 18 所示,数据来源于美国国家冰雪数据中心。图 18(a)、18(b)展示了南北极 2010—2025 年部分南北极区域日冰面积变化曲线,二者在 9 月和 3 月分别达到峰值。1980—2024 年南北极区域日冰面积平均变化如图 18(c)所示,南极的海冰面积变化幅值超过北极约 5.74×10^6 km^2,且南极海冰面积最小值比北极低约 2.03×10^6 km^2。南北极海冰面积年平均变化情况如图 18(d),可以看出,南北极海冰面积均逐年减小,且北极海冰面积逐渐减小的趋势更明显。



(a) 不同年份北极区域冰面积逐日变化　(b) 不同年份南极区域冰面积逐日变化

(c) 2024年南北极区域海冰面积变化　(d) 1980—2024年南北极最大及最小海冰面积变化

图 18　基于微波遥感结冰探测技术的南北极海冰检测结果

Fig. 18　Detection results of Arctic and Antarctic sea ice based on microwave remote sensing ice detection technology

结合表 7 电学法结冰探测技术研究对比可知，电容式、电阻式、微波谐振式及放射线式结冰探测方法均以毫米或厘米级嵌入式传感为主导，探测面积从 36π mm² 到 50 cm² 不等，可在飞机翼面、桥梁钢索及线路电缆等曲面实现嵌入或贴附安装，其中，电容式已在 0 ~ 9.1 mm 取得 0.2 mm 精度。放射线式探测虽能提供高对比度，却因辐射安全未被广泛应用。微波遥感结冰探测视场可扩展至百米至公里尺度，厚度量程可拓展至 4 200 m，精度却从厘米级陡降至米级。电学法结冰探测的核心难题是冰水介电常数差随温度、含盐量及频率呈高度非线性变化，导致传感器误判。基于深度学习反演冰水复介电常数可有效降低传感器误判概率，但仍未完全解决。此外，高湿、高盐雾与振动环境使电极极化阻抗急剧变化，受外界环境干扰，探测结果失真，因此，提高电学法结冰探测的鲁棒性将是其优化的重点。

表 7　电学法结冰探测技术研究对比

Tab. 7　Comparison of electrical ice detection technologies

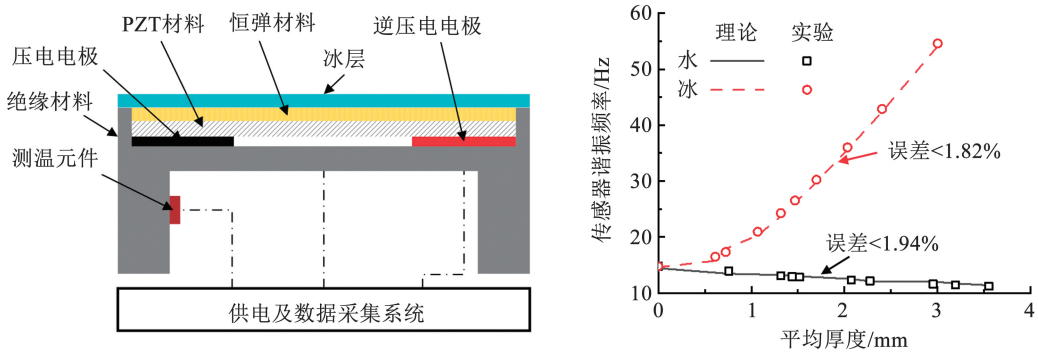
序号	探测方法	是否嵌入	探测面积	冰厚探测	探厚范围	探厚精度	探测冰型	应用场景	年份	文献
1	电容式	是	0 ~ 30 × 45 mm²	是	0 ~ 8 mm	0.21 mm	否	飞机翼面	2025	[23]
2		是	30 × 50 mm²	是	1 ~ 4 mm	约 0.2 mm	否	风电叶片	2024	[157]
3		是	36π mm²	是	0 ~ 9.1 mm	约 0.9 mm	否	桥梁钢索	2019	[166]
4		是	6 × 11 cm²	是	0 ~ 3 mm	0.2 mm	是	飞机翼面	2022	[168]
5	电阻式	是	6 × 18 mm²	否	—	—	否	线路电缆	2022	[170]
6		是	未提及	是	0 ~ 1.8 m	2 cm	否	河道航运	2015	[229]
7	微波谐振	是	5.0 × 5.0 mm²	否	—	—	是	飞机翼面	2019	[192]
8		是	13.0 × 10.5 mm²	是	0 ~ 20 mm	约 0.3 mm	否	飞机翼面	2025	[197]
9		是	22.5 × 20 mm²	是	0 ~ 6 mm	1 mm	否	雷达罩	2021	[205]
10	放射线式	否	0 ~ 50 cm²	否	—	—	否	燃料电池	2018	[230]
11		否	0 ~ 30 × 30 cm²	否	—	—	否	燃料电池	2021	[231]
12	微波遥感	否	未提及	是	0 ~ 2 m	2 cm	否	极地航运	2021	[232]
13		否	140.5 × 140.5 m²	是	< 4 200 m	约 50 m	否	冰川冻土	2010	[233]
14		否	50 × 50 mm²	是	0 ~ 0.8 m	1 cm	否	河道航运	2024	[234]
15		否	300 × 300 m²	是	未提及	28 cm	否	极地航运	2022	[235]

5 机械法结冰探测技术

机械法结冰探测技术利用冰附加质量、刚度或气动扰动引起的结构频率偏移、应变增量、动压差或阻力变化来反演冰厚,具有原理简单、无需复杂标定、抗电磁干扰、可嵌入式监测点冰等优点,但该方法存在灵敏度较低、传感器易疲劳漂移、水膜/积雪误判等问题。谐振式与应变式结冰探测元件可贴于飞机机翼前缘、发动机进气口或风电叶片,实时感知结冰并触发除冰;压差式结冰探测探头嵌入空速管利用结冰导致的气流流动变化判断结冰;阻碍式结冰探测旋转或摆动杆安装于道路气象站等通过结冰增阻自动触发加热或机械除冰,可实现低成本、免维护的恶劣环境结冰预警,此外,基于设备运行异常数据判断结冰的方式也逐渐应用于风电叶片结冰探测。

5.1 机械谐振式

振动元件覆冰后刚度与质量的改变,引发其谐振参数显著变化,机械谐振式结冰探测技术的本质是通过精确测量谐振参数变化实现对结冰状态的高效检测[236]。此外,通过振动元件的逆压电效应,可实现振动除冰,因此,机械谐振式结冰探测具有探除冰一体功能及优异的工程应用价值。机械谐振结冰探测器因结构不同主要分为振管式和压电平膜式[237-239],平膜式结冰探测器基本结构如图 19 所示。学者对两种结构结冰导致的谐振参数变化建立了理论模型,揭示了冰厚对传感器谐振频率与相位偏移的影响规律,得到了谐振参数与冰厚的定量数学关系[240-242]。Shi 等[243]基于上述理论设计了一款平膜式结冰探测装置,分析了冰的积聚对传感器谐振频率的影响,构建了谐振频率与传感器覆冰厚度的数学关系,可实现 0 ~ 1.3 mm 的平均冰厚探测,分辨率最高可达 0.06 mm。机械谐振传感器在实验测试中展现出良好的效果,甘茂锐等[244]将平膜式结冰探测器用于飞机结冰探测,在结冰(0.5 ± 0.2)mm 时提供结冰报警。赵云行等[245]则提出将压电谐振式结冰探测器用于动车组列车,并在风洞中通过实验证明了风速与振动不会导致传感器探冰误判。鉴于飞机与动车组列车对于安全性的极高要求,机械谐振传感器仅用于是否结冰探测,其冰厚探测结果仅作为工作人员参考。



(a) 压电平膜结冰探测器结构示意 (b) 水膜及冰层厚度对谐振频率的影响

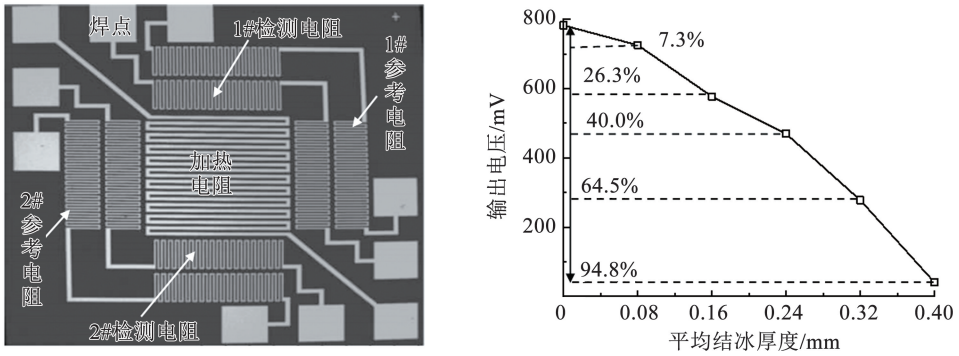
图 19 机械谐振式结冰探测原理及实验结果对比[241]

Fig. 19 Principle of mechanical resonance-based ice detection technology and comparison of experimental results[241]

由于不同温度下冰体冻结内部气泡分布不同,冰体力学特性存在显著差异,分析温度对机械谐振式结冰探测器的影响十分重要。张杰等[246]测试了传感器频率在不同温度下漂移情况,根据记录的结果对传感器冰厚测量结果进行了修正,最高可实现 0.09 mm 的冰厚分辨率,但冰厚测量范围在2 mm 内。除温度漂移修正外,通过神经网络等数据处理方式,传感器信号也可有效提高其探测性能。针对压电平膜结冰探测器用于道路检测因路况复杂而精度及稳定性较差问题,Gui 等[19]通过人工神经网络模型分析了平膜式结冰传感器的谐振谱特征,将冰厚探测精度控制在 0.5 mm 内。平膜式结冰传感器可内嵌在结冰区域,安装方便且探测精准度较好,但是,由于其高灵敏度,污染物对其干扰十分明显,极易造成探测误差。

5.2 应变式

冰雪在结构体上的积聚会导致结构质量、刚度等物理特性发生变化,进而导致结构体如桥梁钢索等发生形变。通过测量结构体因积冰诱发的应力变化即可实现结冰探测。Zhang 等[166]研究发现,压电晶片上覆雪将直接影响其导纳(阻抗的倒数),基于此实现了 0 ~ 9.12 mm 内分辨率 0.91 mm 的平均冰厚探测。李宗兴等[26]也设计了一种 MEMS 应变式结冰传感器,如图 20 所示,可实现约 0.1 mm 精度的结冰探测。然而,此类传感器本质上仅能测量积冰的质量变化,无法有效区分水、冰、泥等不同物质的特性差异。因此,其在工程领域的实际应用受到显著限制,尚未得到广泛应用。



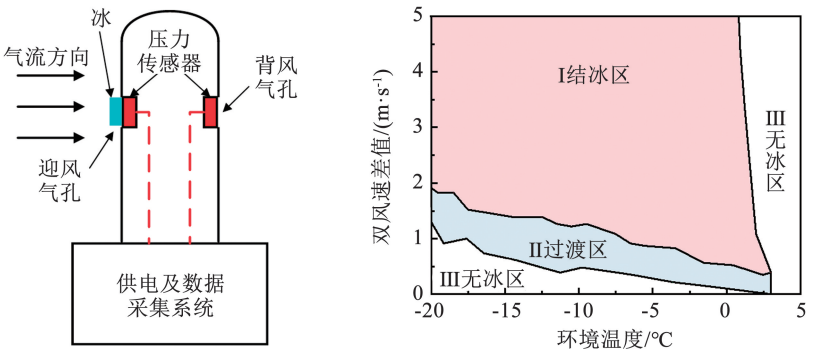
(a) 应变式结冰探测器结构　　(b) 冰厚对传感器输出电压的影响

图 20　应变式结冰探测传感器结构及冰厚探测结果[26]

Fig. 20　Structure of strain-based ice detection sensor and ice thickness detection results [26]

5.3　压差式

压差式结冰传感器的迎风面和背风面都钻有小孔，如图 21(a)所示，不结冰时两孔有一定的压差，结冰时迎风面小孔被堵塞，使压差变化，控制盒内的压差传感器感受此变化，发出一个结冰信号[247-248]。压差传感器也可安装在双传感头上，一传感头小孔上布置有加热装置，可以将积冰融化，而无加热的传感头小孔由于堵塞，测量压力降低。类似地，Tammelin 等[249]提出将两个风速计与叶片放置在相同的环境中。一个风速计被加热，另一个不处理并比较两个风速计的速度。如果未加热的风速计的速度趋向于零或低于加热风速计的速度，则可以假定有冰。少量的冰不会引起速度的显著差异，而且特别容易出错，没有风就无法测量。由于结构与原理限制，该类传感器只能够判断是否有冰覆盖，如图 21(b)。无论是单管结构还是双管结构，当小孔发生堵塞后均不易疏通，且无法区分导致堵塞的物质，因此，仅少量用于风力叶片结冰监测。



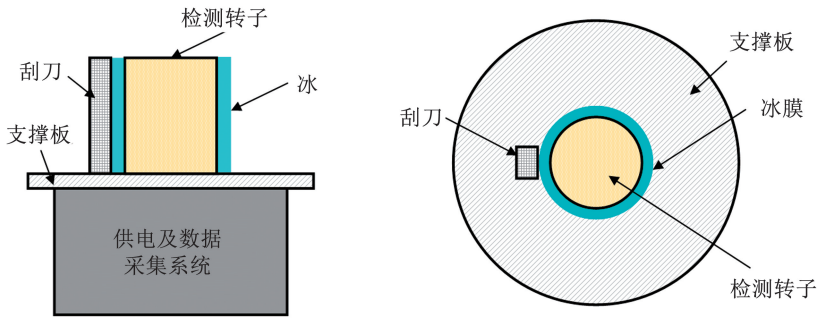
(a) 压差式结冰探测器结构示意　　(b) 基于双风速探测器的风电叶片结冰分区图谱

图 21　基于压差式结冰探测传感器的风电叶片结冰图谱[248]

Fig. 21　Wind turbine blade icing map based on differential pressure ice detection sensor[248]

5.4　阻碍式

英国 Lucas 航空公司设计的 MK3 系列结冰探测器如图 22 所示，是一种典型的阻碍式结冰探测器[181]，一个旋转圆柱体覆冰后直径增加会导致其碰到侧壁设置的刮刀，进而增加了圆柱体的旋转功耗，通过该方式探测是否结冰。一种风力机叶片结冰探测方法通过测量冰层附着引起的风力机发电功率损耗来判断是否结冰[250]。其基本原理是冰层在叶片表面的不均匀附着会改变叶片的气动特性，导致叶片受力不均，从而引起风力机发电功率的下降[251]。Ye 等[252]通过深度学习模型分析了风力机海量运行数据，可实现基于功率损耗情况判断结冰时间，准确率达 96.4%。Guo 等[253]通过 XGBoost 方法建立风机功率和转速正常行为模型，检测风力机发生结冰等异常状况的误差低至 0.53%。诸多类似分析方法证明基于监督控制和数据采集系统的结冰探测方法在风电设备结冰故障检测中的可行性[254]。风电叶片上的积冰还会改变其共振频率，因此，可以通过将风机振动频率与结冰历史频率进行比较来确认叶片是否冻结[255]。此外，船舶航行受冰层阻碍导致其功率增加[256-257]、电缆因覆冰而形变[258-259]等现象均可被用于判断是否结冰。这些通过设备自身运行参数受冰层影响而发生变化的探冰方式不需要额外增设传感器，但设备运行状态极易受其配置参数、环境参数的影响而发生变化，因此，探冰准确率较低。



(a) 传感器结构正视图 (b) 传感器结构俯视图

图 22 MK3 型阻碍式结冰探测传感器结构

Fig. 22 Structure of MK3 mechanical-obstruction ice detection sensor

表 8 整理了部分机械法结冰探测技术研究,可以看出,嵌入型方案占据绝对主导,其共性特征在于利用结构自身形变、谐振频率漂移或压差变化作为结冰探测敏感量,探测面积集中于 16 ~ 161π mm^2,可在交通道路、动车机组与风电叶片表面实现嵌入安装。其中,机械谐振式探测技术已在 0 ~ 10 mm 将精度由 0.5 mm 推进至 0.04 mm,并可实现冰型判别功能,但应变式与压差式、阻碍式结冰探测技术仍停留在冰厚或载荷阈值报警层面,尚未实现冰型识别,且阻碍式因非嵌入安装易受风载干扰。

表 8 机械法结冰探测技术研究对比

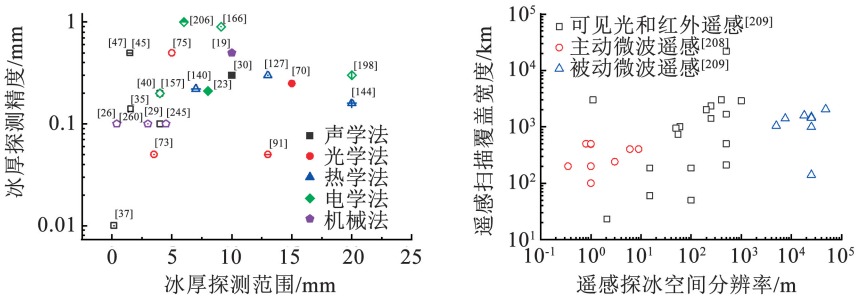
Tab. 8 Comparison of mechanical ice detection technologies

序号	探测方法	是否嵌入	探测面积	冰厚探测	探厚范围	探厚精度	探测冰型	应用场景	年份	文献
1		是	161π mm^2	是	0 ~ 10 mm	0.5 mm	是	交通道路	2019	[19]
2	机械谐振	是	未提及	是	0 ~ 4.5 mm	0.1 mm	否	动车机组	2020	[245]
3		是	约 100π mm^2	是	0 ~ 3.0 mm	0.1 mm	否	交通道路	2022	[260]
4	应变式	是	4 × 4 mm^2	是	0 ~ 0.4 mm	0.1 mm	否	飞机翼面	2011	[26]
5	压差式	是	未提及	否	—	—	—	风电叶片	2019	[248]
6	阻碍式	否	未提及	否	—	—	—	风电叶片	2024	[261]

6 总结与展望

针对飞行器及道路等毫米-厘米级结冰即可能诱发灾难性后果的场景,图 23(a)整理了不同类型接触式结冰探测技术,集中于 0 ~ 20 mm 探测区间,分辨率普遍在 0.1 ~ 1.0 mm。约 90% 的方案将量程限定在 0 ~ 15 mm,并实现了 0.1 ~ 0.3 mm 的测量精度。其中,声学法与光学法结冰探测技术因信号敏感性强,平均精度优于其他技术。Wang 等[37]提出的声学法结冰探测技术在痕量冰及水膜测量中达到 8 μm 的极限分辨率。然而,声学及光学结冰探测技术对环境扰动敏感,现场误差常显著高于实验室结果。相比之下,机械法与电学法凭借结构简单、鲁棒性高,可稳定实现 0.1 ~ 0.3 mm 精度,已足以满足航空器表面结冰监测需求。对于风力叶片、输电线等厘米-分米级结冰才构成威胁的场景,摄像式与阻碍式结冰探测技术因量程大、部署便利被广泛采用,其典型精度为 1 ~ 10 mm。极地科考与船舶运输则更关注海冰及河冰分布密度而非厚度,故图 23(b)比较了各类遥感方案的性能。被动微波遥感空间分辨率大于 1 km,适用于极地海冰与高原冰川的大尺度探测。主动微波、可见光及红外遥感结冰探测兼具更高空间分辨率与厚度反演能力,可为航道冰情监测与海上运输安全保障提供关键数据。

结冰探测技术历经“单点阈值—分布成像—智能融合”的演进,已步入多物理场耦合与数据驱动并行的新阶段。本文系统梳理表明,声、光、热、电、力等单一模态各具优势,却难以在复杂服役条件下同时满足高精度、高空间覆盖、高鲁棒性的需求,而将多模态信息在时-空-谱三维深度耦合,已成为突破性能瓶颈的关键。Jiang 等[167]将光纤式结冰探测器、电容结冰探测器以及温度传感器耦合,并通过 WOA-BP 模型优化,结冰状态探测精度高达98.8%。Gui 等[262]和谭舒亚等[263]将平膜式、电容式以及光纤式结冰探测器装置在一个探测器中,通过多传感器融合以提高道路结冰探测的精度。经道路等真实场景的多工况验证,多物理场耦合结冰探测系统在冰厚、冰型与生长速率的识别精度上较单一方法提升显著,验证了其在复杂环境下的鲁棒性与工程适用性优势。



(a) 不同类型结冰原位探测技术对比　　(b) 不同类型结冰遥感探测技术对比

图 23　不同类型接触式结冰探测技术与遥感结冰探测技术对比

Fig. 23　Comparison of different types of contact ice detection technologies with remote sensing ice detection technologies

近年来，机器学习尤其是深度神经网络在特征自提取、非线性映射和不确定性量化上的飞跃，为“物理 + 数据”双轮驱动的结冰探测提供了全新范式。卷积网络可将红外热像与微波散射图融合，实现毫米级冰厚反演；图神经网络能够把光纤分布式应变与声表面波频散关联，重构冰层刚度分布；强化学习则可在飞行/风机运行中实时优化激励-传感策略，实现能量最优的按需除冰。实验与现场数据均显示，多方法耦合框架下的结冰识别准确率可从传统的 80% ~90% 提升至 98% 以上。未来，结冰探测技术的优化方向为：1）构建多物理场结冰大数据平台，构建冰型、冰厚探测的统一标准；2）发展精简化神经网络模型，实现快响应实时探测；3）把分布式传感器网络与机器学习算法集成，形成自学习、自校准、自决策的智能化结冰感知体系。多方法耦合与机器学习神经网络的深度融合，将推动结冰探测从“感知有无”迈向“动态演化”，为航空安全、能源高效利用以及公共基础设施安全提供保障。

参考文献

[1] Shao Keke, Zhen Zekang, Gao Runmiao, et al. Comparative experimental study of the effect of loading rate on the typical mechanical properties of bubble and clear ice cubes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2024, 159: 111264. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2024.111264

[2] Shao Keke, Song Mengjie, Shen Jun, et al. Experimental study on the distribution and growth characteristics of trapped air bubbles in ice slices at different freezing temperatures [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 244: 122600. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122600

[3] Liu Zhongxin, Zhang Xuan, Song Mengjie, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of ice melting processes under point-source bubble flows[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108112. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108112

[4] Rekuviene R, Samaitis V, Jankauskas A, et al. Early-stage ice detection utilizing high-order ultrasonic guided waves[J]. Sensors, 2024, 24(9): 2850. DOI: 10.3390/s24092850

[5] Dilorenzo T, Habibzadeh-Bigdarvish O, Li Dongfeng, et al. Laboratory simulation of frost on a pavement column inside a freezer under a controlled environment [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2023, 24(2): 2265031. DOI: 10.1080/10298436.2023.2265031

[6] 杨鹤. 国家防灾减灾救灾委员会办公室 应急管理部发布 2024 年全国自然灾害基本情况[EB/OL]. (2025-01-18). https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202501/content_6999765.htm
Yang He. Office of the national committee for disaster prevention, mitigation and relief ministry of emergency management release of basic information on national natural disasters in 2024 [EB/OL]. (2025-01-18). https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202501/content_6999765.htm

[7] Samuelsen E M. Ship-icing prediction methods applied in operational weather forecasting[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2018, 144(710): 13. DOI: 10.1002/qj.3174

[8] 邵苛苛，宋孟杰，张旋，等. 冰中微尺度受陷气泡生长分布特性与宏观热力影响综述[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(6): 152
Shao Keke, Song Mengjie, Zhang Xuan, et al. A review of micro-scale trapped air bubble growth distribution characteristics and thermal mechanical effects in ice[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(6): 152

[9] Müller N C, Løw-Hansen B, Borup K T, et al. UAV icing: development of an ice protection system for the propeller of a small UAV[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 213: 103938. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103938

[10] 张永杰，张露，罗贵森. 飞机翼面结冰试验积冰厚度探测技术研究进展[J]. 应用力学学报, 2023, 40(3): 504
Zhang Yongjie, Zhang Lu, Luo Guisen. Advances in research on ice accumulation thickness detection technology in aerofoil icing test [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(3): 504

[11] 邵苛苛，宋孟杰，沈俊，等. 极地低温环境结冰预探测方法与防除破冰技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(2): 1
Shao Keke, Song Mengjie, Shen Jun, et al. Research progress on icing prediction and detection methods, and anti/de-icing and ice-breaking technologies in polar low-temperature environments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(2): 1. DOI: 10.11918/202407059

[12] 秦建敏，沈冰. 基于冰和水导电特性的新型冰层厚度传感器[J]. 传感器技术, 2004(9): 55
Qin Jianming, Shen Bing. New ice thickness sensor based on electric conduction characteristic of water and ice[J]. Journal of Transducer Technology, 2004(9): 55

[13] Madi E, Pope K, Huang Weimin, et al. A review of integrating ice detection and mitigation for wind turbine blades[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 103: 269. DOI: 10.1016/j.

rser. 2018. 12. 019

[14] Dilorenzo T, Yu Xinbao. Use of ice detection sensors for improving winter road safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 191: 107197. DOI: 10. 1016/j. aap. 2023. 107197

[15] 张鸿健, 张晏鑫, 熊建军, 等. 冰层中 Lamb 波传播特性的数值模拟和实验研究[J]. 实验流体力学, 2023, 37(2): 68
Zhang Hongjiang, Zhang Yanxing, Xiong Jianjun, et al. Numerical simulation and experimental research of Lamb wave propagation characteristics in ice [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2023, 37(2): 68

[16] Ge Junfeng, Ye Lin, Zou Jianhong. A novel fiber-optic ice sensor capable of identifying ice type accurately[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 175: 35. DOI: 10. 1016/j. sna. 2011. 12. 016

[17] Dongo P D, Machrafi H, Minetti C, et al. A heat-pulse method for detecting ice formation on surfaces [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 22: 100813. DOI: 10. 1016/j. tsep. 2020. 100813

[18] Shi Han, Song Mengjie, Chen Bin, et al. High precision saltwater ice thickness detection method with different salinity under saltwater cover on a horizontal cold plate[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 267: 125794. DOI: 10. 1016/j. applthermaleng. 2025. 125794

[19] Gui Kang, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. The piezoelectric road status sensor using the frequency scanning method and machine-learning algorithms[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 287: 8. DOI: 10. 1016/j. sna. 2018. 12. 048

[20] He Qiang, Li Kangshuai, Xu Zehua, et al. Research progress on construction strategy and technical evaluation of aircraft icing accretion protection system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(10): 1. DOI: 10. 1016/j. cja. 2023. 07. 003

[21] 谭舒亚, 葛俊锋, 叶林, 等. 非接触式路面结冰探测技术研究进展[J]. 公路, 2015, 60(6): 244
Tan Shuya, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Research progress on non-contact road surface ice detection technology[J]. Highway, 2015, 60(6): 244

[22] Aguiar M, Gaspar P D, Da Silva P D. Image recognition method for frost sensing applications [J]. Energy Reports, 2022, 8: 234. DOI: 10. 1016/j. egyr. 2022. 01. 049

[23] Gui Kang, Zhou Yi, Bai Hongfei, et al. Flexible ice detection film utilizing arrayed complex impedance sensors [J]. Measurement, 2025, 245: 116637. DOI: 10. 1016/j. measurement. 2024. 116637

[24] Maio L, Memmolo V, Christophel N, et al. Electromechanical admittance method to monitor ice accretion on a composite plate [J]. Measurement, 2023, 220: 113290. DOI: 10. 1016/j. measurement. 2023. 113290

[25] Zhao Xiang, Rose J L. Ultrasonic guided wave tomography for ice detection[J]. Ultrasonics, 2016, 67: 212. DOI: 10. 1016/j. ultras. 2015. 12. 005

[26] 李宗兴, 陈德勇, 王军波. MEMS 应变式结冰传感器设计与制作[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8): 1108
Li Zongxing, Chen Deyong, Wang Junbo. Design and fabrication of MEMS strain gauge icing sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(8): 1108

[27] Abdalati W, Steffen K. Passive microwave-derived snow melt regions on the Greenland Ice Sheet [J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(7): 787. DOI: 10. 1029/95gl00433

[28] Bulusu R, Dhekne A. uThaw: ultra-wideband wireless solid-liquid state transition sensor to detect thawing of food[J]. IEEE Sensors Letters, 2025, 9(3): 1. DOI: 10. 1109/lsens. 2025. 3537922

[29] Zhang Yabo, Ge Junfeng, Gui Kang, et al. Mixed-phase measurement during atmospheric icing using ultrasonic pulse-echo (UPE) and signal separation techniques[J]. Measurement, 2025, 245: 116679. DOI: 10. 1016/j. measurement. 2025. 116679

[30] Wang Yan, Wang Yuan, Chen Siyu, et al. Focused ultrasonic transducer for aircraft icing detection[J]. Ultrasonics, 2025, 147: 107509. DOI: 10. 1016/j. ultras. 2024. 107509

[31] Hansman R J, Kirby M S. Measurement of ice accretion using ultrasonic pulse-echo techniques[J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(6): 530. DOI: 10. 2514/3. 45160

[32] Hansman R J, Kirby M S. Measurement of ice growth during simulated and natural icing conditions using ultrasonic pulse-echo techniques[J]. Journal of Aircraft, 1986, 23(6): 492. DOI: 10. 2514/3. 45334

[33] Liu Yang, Bond L J, Hu Hui. Ultrasonic-attenuation-based technique for ice characterization pertinent to aircraft icing phenomena[J]. AIAA Journal, 2017, 55(5): 1602. DOI: 10. 2514/1. J055500

[34] Zhou Nianpeng, Song Pan, Zhang Yang, et al. Design of high-precision multi-channel ice detection system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2897(1): 012019. DOI: 10. 1088/1742 – 6596/2897/1/012019

[35] Wang Yuan, Zhang Yang, Wang Yan, et al. Quantitative measurement method for ice roughness on an aircraft surface[J]. Aerospace, 2022, 9(12): 739. DOI: 10. 3390/aerospace9120739

[36] Liu Yang, Chen Wenli, Bond L J, et al. Development of an ultrasonic pulse-echo (UPE) technique for aircraft icing studies [J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1581(1): 1757. DOI: 10. 1063/1. 4865036

[37] Wang Yuan, Wang Yang, Li Wen, et al. Study on freezing characteristics of the surface water film over glaze ice by using an ultrasonic pulse-echo technique [J]. Ultrasonics, 2022, 126: 106804. DOI: 10. 1016/j. ultras. 2022. 106804

[38] Gui Kang, Zhang Yabo, Ge Junfeng, et al. Ice porosity measurement utilizing dynamic wavelet fingerprint technology[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023(S1): 118. DOI: 10. 16356/j. 1005 – 1120. 2023. S1. 011

[39] Ge Junfeng, Li Longteng, Zhang Yabo, et al. Ice type identification during dynamic icing process based on ultrasonic pulse echo technique [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2025, 393: 116817. DOI: 10. 1016/j. sna. 2025. 116817

[40] Zeng Xingchang, Ong Huiling, Haworth L, et al. Fundamentals of monitoring condensation and frost/ice formation in cold environments using thin-film surface-acoustic-wave technology[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(29): 35648. DOI: 10. 1021/acsami. 3c04854

[41] 赵伟伟, 朱春玲, 陶明杰, 等. 超声导波技术用于飞机结冰探测的实验研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 269
Zhao Weiwei, Zhu Chunling, Tao Mingjie, et al. Experimental study on ultrasonic guided wave technology for aircraft icing detection[J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2018, 40(2): 269

[42] Gao Huidong, Rose J L. Ice detection and classification on an aircraft wing with ultrasonic shear horizontal guided waves [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(2): 334. DOI: 10. 1109/TUFFC. 2009. 1042

[43] Shoja S, Berbyuk V, Boström A E. Investigating the application of guided wave propagation for ice detection on composite materials [J]. International Conference on Engineering Vibration, 2015, 2015: 152

[44] Mendig C, Riemenschneider J, Monner H P, et al. Ice detection by ultrasonic guided waves[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2018, 9(3): 405. DOI: 10.1007/s13272 - 018 - 0289 - 0

[45] Zhang Yanxin, Zhang Hongjian, Yi Xian, et al. Analysis method and experimental study of ice accumulation detection signal based on Lamb waves[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(8): 388. DOI: 10.1016/j.cja.2024.04.014

[46] Zhou Chao, Su Zhongqing, Cheng Li. Probability-based diagnostic imaging using hybrid features extracted from ultrasonic Lamb wave signals[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(12): 125005. DOI: 10.1088/0964 - 1726/20/12/125005

[47] 张晏鑫, 张鸿健, 熊建军, 等. 基于超声导波的积冰量辨识及定位方法[J]. 航空学报, 2024, 45(16): 129293
Zhang Yanxing, Zhang Hongjian, Xiong Jianjun, et al. Ice accumulation identification and localization method based on ultrasonic guided waves[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(16): 129293. DOI: 10.7527/S1000 - 6893.2023.29293

[48] Anisimkin V I, Voronova N V. New modification of the acoustic Lamb waves and its application for liquid and ice sensing[J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106496. DOI: 10.1016/j.ultras.2021.106496

[49] Smirnov A, Anisimkin V, Ageykin N, et al. Influence of Lamb wave anisotropy on detection of water-to-ice phase transition[J]. Sensors, 2024, 24(24): 7969. DOI: 10.3390/s24247969

[50] Jiménez A A, García M F P, Moraleda V B, et al. Linear and nonlinear features and machine learning for wind turbine blade ice detection and diagnosis[J]. Renewable Energy, 2019, 132: 1034. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.050

[51] Marko J R, Jasek M. Sonar detection and measurements of ice in a freezing river I: methods and data characteristics[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 63(3): 121. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.05.005

[52] Mclaren A S. The under-ice thickness distribution of the Arctic Basin as recorded in 1958 and 1970[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1989, 94(C4): 4971. DOI: 10.1029/jc094ic04p04971

[53] Wadhams P, Horne R J. An analysis of ice profiles obtained by submarine sonar in the beaufort sea[J]. Journal of Glaciology, 1980, 25(93): 401. DOI: 10.3189/s0022143000015264

[54] Hudson R. Annual measurement of sea-ice thickness using an upward-looking sonar[J]. Nature, 1990, 344(6262): 135. DOI: 10.1038/344135a0

[55] Behrendt A, Dierking W, Fahrbach E, et al. Sea ice draft in the Weddell Sea, measured by upward looking sonars[J]. Earth System Science Data, 2013, 5(1): 209. DOI: 10.5194/essd - 5 - 209 - 2013

[56] Fissel D B, Marko J R, Ross E, et al. Improvements in upward looking sonar-based sea-ice measurements: a case study for 2007 ice features in Northumberland strait, Canada[J]. OCEANS 2007, 2007: 1. DOI: 10.1109/Oceans.2007.4449194

[57] Belliveau D J, Hayden H, Prinsenberg S. Ice drift and draft measurements from moorings at the confederation bridge[J/OL]. Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions, 2001

[58] 冯常慧, 刘强, 葛印超. 基于仰视声呐的冰厚探测技术研究[J]. 声学与电子工程, 2017(3): 4
Feng Changhui, Liu Qiang, Ge Yinchao. Research on ice thickness detection technology based on up-looking sonar[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2017(3): 4

[59] Lucieer V, Nau A W, Forrest A L, et al. Fine-scale sea ice structure characterized using underwater acoustic methods[J]. Remote Sensing, 2016, 8(10): 821. DOI: 10.3390/rs8100821

[60] Bassett C, Lavery A C, Lyons A P, et al. Direct inference of first-year sea ice thickness using broadband acoustic backscattering[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2020, 147(2): 824. DOI: 10.1121/10.0000619

[61] Ghobrial T R, Loewen M R, Hicks F E. Characterizing suspended frazil ice in rivers using upward looking sonars[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 113. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.10.002

[62] Ghobrial T R, Loewen M R, Hicks F E. Continuous monitoring of river surface ice during freeze-up using upward looking sonar[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 86: 69. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.10.009

[63] Khvorostovsky K, Hendricks S, Rinne E. Surface properties linked to retrieval uncertainty of satellite sea-ice thickness with upward-looking sonar measurements[J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 3094. DOI: 10.3390/rs12183094

[64] Ikiades A A, Armstrong D J, Howard G. Optical diffusion and polarization characteristics of ice accreting in dynamic conditions using a backscattering fiber optic technique[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 140(1): 43. DOI: 10.1016/j.sna.2007.06.009

[65] 黄昌尧, 叶林, 葛俊锋, 等. 风力机叶片结冰检测系统的试验研究[J]. 仪表技术与传感器, 2014(6): 86
Huang Changyao, Ye Lin, Ge Junfeng, et al. Experimental study of wind turbine blade icing detection system[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(6): 86

[66] 李薇, 叶林, 张杰, 等. 光纤式结冰传感器的试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 16
Li Wei, Ye Lin, Zhang Jie, et al. Experimental study on the fiber-optic sensor for direct ice detection[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2009, 37(8): 16

[67] Li Wei, Zhang Jie, Ye Lin, et al. A fiber-optic solution to aircraft icing detection and measurement problem[C]// 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science. Kiev, Ukraine, 2009, 1: 357. DOI: 10.1109/ITCS.2009.77

[68] 但汉成, 刘扬, 凌桂香, 等. 光纤式结冰传感器探测沥青路面结冰过程[J]. 公路交通科技, 2014, 31(4): 7
Dan Hancheng, Liu Yang, Ling Guixiang, et al. Probing freezing process of ice on asphalt pavement with fiber-optic ice sensor[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(4): 7

[69] 许一飞, 叶林, 许丹丹, 等. 基于多传感器技术的机场地面结冰检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2012(9): 36
Xu Yifei, Ye Lin, Xu Dandan, et al. Airport ground icing detection system based on multi-sensor technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(9): 36

[70] 闫泽豪, 葛俊锋, 叶林, 等. 基于模拟导线的输电线路覆冰探测系统[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 63
Yan Zehao, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Transmission line ice detection system based on the simulated wire[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(6): 63

[71] Ikiades A. Fiber optic ice sensor for measuring ice thickness, type and the freezing fraction on aircraft wings[J]. Aerospace, 2023, 10(1): 31. DOI: 10.3390/aerospace10010031

[72] Zou Jianhong, Ye Lin, Ge Junfeng, et al. Novel fiber optic sensor for ice type detection[J]. Measurement, 2013, 46(2): 881. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.09.020

[73] Ge Junfeng, Liu Jinyi, Gui Kang, et al. Atmospheric icing measurement and online ice type recognition for aircraft utilizing optical fiber sensor and machine learning algorithms [J]. Measurement, 2022, 205: 112215. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112215

[74] 刘进一, 熊建军, 桂康, 等. 基于多光谱和复阻抗的复合结冰探测技术[J]. 航空学报, 2023, 44(增刊2): 729309
Liu Jinyi, Xiong Jianjun, Gui Kang, et al. Integrated ice detection technology based on multispectral and complex impedance principles [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(S2): 729309. DOI: 10.7527/S1000-6893.2023.29309

[75] Ikiades A, Howard G, Armstrong D J, et al. Measurement of optical diffusion properties of ice for direct detection ice accretion sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 140(1): 24. DOI: 10.1016/j.sna.2007.05.036

[76] Moroto Y, Maeda K, Ogawa T, et al. Snow-or ice-covered road detection in winter road surface conditions using deep neural networks [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39(19): 2935. DOI: 10.1111/mice.13233

[77] Won J, Park J W, Shim C, et al. Bridge-surface panoramic-image generation for automated bridge-inspection using deepmatching[J]. Structural Health Monitoring, 2021, 20(4): 1689. DOI: 10.1177/1475921720930380

[78] Montminy D P, Roberge P, Lemay J, et al. Validation of a numerical ice accretion model on a wind turbine with high-resolution field data[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 201: 103620. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103620

[79] Winkel P, Wilbert S, Röger M, et al. Cell-resolved PV soiling measurement using drone images[J]. Remote Sensing, 2024, 16(14): 2617. DOI: 10.3390/rs16142617

[80] Wang Jingjing, Wang Junhua, Shao Jianwei, et al. Image recognition of icing thickness on power transmission lines based on a least squares Hough transform[J]. Energies, 2017, 10(4): 415. DOI: 10.3390/en10040415

[81] Liu Yong, Li Qiran, Farzaneh M, et al. Image characteristic extraction of ice-covered outdoor insulator for monitoring icing degree[J]. Energies, 2020, 13(20): 5305. DOI: 10.3390/en13205305

[82] Buckley E M, Farrell S L, Duncan K, et al. Classification of sea ice summer melt features in high-resolution IceBridge imagery[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(5): 1. DOI: 10.1029/2019JC015738

[83] Kim D H, Nam J H. Determination of the lower boundary of a rotating ice patch for ice thickness estimation using image convolution and machine learning[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 103009. DOI: 10.1016/j.coldregions.2020.103009

[84] 熊显名, 张乾坤, 秦祖军. 基于可见-近红外光谱的路面状况识别的研究[J]. 红外技术, 2021, 43(2): 131
Xiong Xianming, Zhang Qiankun, Qin Zujun. Research on highway state detection based on visible-near-infrared spectrum[J]. Infrared Technology, 2021, 43(2): 131

[85] Šabanovicc̆ E, Žuraulis V, Prentkovskis O, et al. Identification of road-surface type using deep neural networks for friction coefficient estimation[J]. Sensors, 2020, 20(3): 612. DOI: 10.3390/s20030612

[86] Zheng Xuejing, Shi Rui, You Shijun, et al. Experimental study of defrosting control method based on image processing technology for air source heat pumps[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51: 101667. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101667

[87] Li Zhaoyang, Wang Wei, Sun Yuying, et al. Applying image recognition to frost built-up detection in air source heat pumps[J]. Energy, 2021, 233: 121004. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121004

[88] Hu Qin, Xu Xing, Leng Dongbing, et al. A method for measuring ice thickness of wind turbine blades based on edge detection[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 192: 103398. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103398

[89] Wei Fangzheng, Guo Zhiyong, Han Qiaoli, et al. Estimation of wind turbine blade icing volume based on binocular vision[J]. Applied Sciences, 2025, 15(1): 114. DOI: 10.3390/app15010114

[90] Kreutz M, Alla A A, Eisenstadt A, et al. Ice detection on rotor blades of wind turbines using RGB images and convolutional neural networks[J]. Procedia CIRP, 2020, 93: 1292. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.107

[91] Dai Dongxu, Hu Yan, Qian Hao, et al. A novel detection algorithm for the icing status of transmission lines[J]. Symmetry, 2024, 16(10): 1264. DOI: 10.3390/sym16101264

[92] Hu Minghe, He Jiancang, Alsabaan M. Image identification method of ice thickness on transmission line based on visual sensing [J]. Mobile Networks and Applications, 2023, 28(5): 1783. DOI: 10.1007/s11036-023-02244-1

[93] Ansari S, Rennie C D, Seidou O, et al. Automated monitoring of river ice processes using shore-based imagery[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 142: 1. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.06.011

[94] Wright N C, Polashenski C M, Mcmichael S T, et al. Observations of sea ice melt from operation IceBridge imagery [J]. The Cryosphere, 2020, 14(10): 3523. DOI: 10.5194/tc-14-3523-2020

[95] Ishii Y, Fuchida M, Ozeki K, et al. Investigation on the use of polarized images for frozen road surface recognition [J]. 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), 2025: 1581. DOI: 10.1109/SII59315.2025.10870979

[96] 顾昊, 李勃, 张潇, 等. 基于偏振测量的路面积水积冰检测方法[J]. 电子测量技术, 2011, 34(7): 99
Gu Hao, Li Bo, Zhang Xiao, et al. Detection of road surface water and ice based on polarization measurement [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(7): 99

[97] 苑会珍, 葛俊锋, 叶林, 等. 基于线偏振度的非接触式路面状态探测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2017(8): 89
Wan Huizhen, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Noncontact road condition detection method based on degree of linear polarization [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(8): 89

[98] Yamada M, Ueda K, Horiba I, et al. Discrimination of the road condition toward understanding of vehicle driving environments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2001, 2(1): 26. DOI: 10.1109/6979.911083

[99] Nguyen C V, Milford M, Mahony R. 3D tracking of water hazards with polarized stereo cameras [C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, 2017: 5251. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989616

[100] 张佳鹏, 曹桂芳, 周晓旭. 基于红外技术的路面结冰预警系统研究进展[J]. 交通运输部管理干部学院学报, 2015, 25(3): 42

Zhang Jiapeng, Cao Guifang, Zhou Xiaoxu. Research progress on road surface ice warning systems based on infrared technology[J]. Journal of Transport Management Institute Ministry of Transport, 2015, 25(3): 42

[101] 张镇, 葛俊锋, 叶林, 等. 基于神经网络的主动式红外结冰探测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 1
Zhang Zhen, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Active infrared icing detection using neural networks [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2010, 38(6): 1

[102] Casselgren J, Rosendahl S, Sjödahl M, et al. Road condition analysis using NIR illumination and compensating for surrounding light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 77: 175. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.08.002

[103] Colace L, Santoni F, Assanto G. A near-infrared optoelectronic approach to detection of road conditions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 633. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.01.003

[104] Grassi S, Jiménez A, Ruiz J, et al. Use of ultrasound and NIRs as tools for monitoring ice formation in superchilled meat[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 369: 111957. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2024.111957

[105] Hopkinson C, Sitar M, Chasmer L, et al. Mapping snowpack depth beneath forest canopies using airborne LiDAR [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2004, 70(3): 323. DOI: 10.14358/pers.70.3.323

[106] Zheng Zeshi, Ma Qin, Jin Shichao, et al. Canopy and terrain interactions affecting snowpack spatial patterns in the Sierra Nevada of California [J]. Water Resources Research, 2019, 55(11): 8721. DOI: 10.1029/2018wr023758

[107] Jörg P, Fromm R, Sailer R, et al. Measuring snow depth with a terrestrial laser ranging system [C]// Proceedings of the 2006 International Snow Science Workshop. Telluride, Colorado, 2006: 452

[108] Kwok R, Panzer B, Leuschen C, et al. Airborne surveys of snow depth over Arctic sea ice [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2011, 116 (C11018). DOI: 10.1029/2011JC007371

[109] Lu Xiaomei, Hu Yongxiang, Liu Zhaoyan, et al. Observations of Arctic snow and sea ice cover from CALIOP LiDAR measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 194: 248. DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.046

[110] Liu Xinyuan, Ma Yue, Yang Jian, et al. Cloud optical thickness estimation over oceans combining active and passive information of ICESat-2 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1. DOI: 10.1109/tgrs.2024.3471916

[111] Morrison A L, Kay J E, Chepfer H, et al. Isolating the liquid cloud response to recent Arctic sea ice variability using spaceborne LiDAR observations [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(1): 473. DOI: 10.1002/2017jd027248

[112] Lu Xiaomei, Hu Yongxiang, Omar A, et al. LiDAR attenuation coefficient in the global oceans: insights from ICESat-2 mission [J]. Optics Express, 2023, 31(18): 29107. DOI: 10.1364/oe.498053

[113] Landy J C, Isleifson D, Komarov A S, et al. Parameterization of centimeter-scale sea ice surface roughness using terrestrial LiDAR [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1271. DOI: 10.1109/tgrs.2014.2336833

[114] Vúrnai T, Cahalan R F. Potential for airborne offbeam LiDAR measurements of snow and sea ice thickness [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (C12). DOI: 10.1029/2007jc004091

[115] Kacimi S, Kwok R. The Antarctic sea ice cover from ICESat-2 and CryoSat-2: freeboard, snow depth, and ice thickness [J]. The Cryosphere, 2020, 14(12): 4453. DOI: 10.5194/tc-14-4453-2020

[116] Karimi N, Farokhnia A, Sheshangosht S, et al. Using UAV and satellite image data for analyzing the elevation change of debris-covered glaciers and its associated driving factors [J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(17): 577. DOI: 10.1007/s12665-021-09899-7

[117] Riehm M, Gustavsson T, Bogren J, et al. Ice formation detection on road surfaces using infrared thermometry [J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83: 71. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.06.004

[118] Rieman L, Guk E, Kim T, et al. Development of a novel multi-channel thermocouple array sensor for in-situ monitoring of ice accretion[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2165. DOI: 10.3390/s20082165

[119] Guk E, Son C, Rieman L, et al. Experimental study on ice intensity and type detection for wind turbine blades with multi-channel thermocouple array sensor[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 189: 103297. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103297

[120] Gonzalez M, Frövel M. Flight tests results of a Fiber Bragg Gratings based ice sensor [J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 224: 104248. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104248

[121] Zhao Yue, Tian Hao, Han Qiaoling, et al. Real-time monitoring of water and ice content in plant stem based on latent heat changes [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 307: 108475. DOI: 10.1016/j.agrformet.2021.108475

[122] 程刚. 恒温热线测量云中液态水含量的原理和方法[J]. 气象科技, 1979(1): 1
Cheng Gang. Principles and methods for measuring liquid water content in clouds using constant-temperature hot-wire sensors[J]. Meteorological Science and Technology, 1979(1): 1

[123] 祁相莹, 张洪, 郑英. 基于后流特性的 SLD 结冰探测数值研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(7): 173
Qi Xiangying, Zhang Hong, Zheng Ying. Numerical study of SLD icing detection based on backflow characteristics[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(7): 173

[124] Korolev A V, Strapp J W, Isaac G A, et al. The Nevzorov airborne hot-wire LWC-TWC Probe: principle of operation and performance characteristics [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15(6): 1495

[125] Korolev A, Strapp J, Isaac G, et al. Improved airborne hot-wire measurements of ice water content in clouds [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30: 2121. DOI: 10.1175/JTECH-D-13-00007.1

[126] Lucke J, Jurkat-Witschas T, Heller R, et al. Icing wind tunnel measurements of supercooled large droplets using the 12 mm total water content cone of the Nevzorov probe [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2022, 15(24): 7375. DOI: 10.5194/amt-15-7375-2022

[127] Zhang Tengfei, Wang Shanran, Wang Feng. Adopting a hot film to measure thickness of an ice layer under sweeping wind[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024,

154: 107453. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107453
[128] Tian Zhengchao, Ren Tusheng, Kojima Y, et al. An improved thermo-time domain reflectometry method for determination of ice contents in partially frozen soils[J]. Journal of Hydrology, 2017, 555: 786. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.055
[129] Liao Zeliang, Cheng Yubing, Ying Jiang, et al. Ice bottom evolution derived from thermistor string-based ice mass balance buoy observations[J]. International Journal of Digital Earth, 2023, 16(1): 3085. DOI: 10.1080/17538947.2023.2242326
[130] Yousuf A, Khawaja H, Virk M S. A review of infrared thermography applications for ice detection and mitigation[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 218: 104058. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.104058
[131] Drüe C, Heinemann G. High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data[J/OL]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(20). DOI: 10.1029/2004GL020808
[132] Ludwig V, Spreen G, Haas C, et al. The 2018 North Greenland polynya observed by a newly introduced merged optical and passive microwave sea-ice concentration dataset[J]. The Cryosphere, 2019, 13(7): 2051. DOI: 10.5194/tc-13-2051-2019
[133] Willmes S, Heinemann G. Sea-ice wintertime lead frequencies and regional characteristics in the Arctic, 2003-2015[J]. Remote Sensing, 2016, 8(1): 4. DOI: 10.3390/rs8010004
[134] Ye Yufang, Wang Xin, Sun Shaozhe, et al. A new sea ice concentration retrieval algorithm from thermal infrared imagery[J]. International Journal of Digital Earth, 2024, 17(1): 2353116. DOI: 10.1080/17538947.2024.2353116
[135] Shi Wenqin, Yuan Shuai, Liu Chengyu, et al. Inversion of sea ice concentration in the Liaodong bay from MODIS data[J]. Remote Sensing, 2022, 14(18): 4439. DOI: 10.3390/rs14184439
[136] Paul S, Huntemann M. Improved machine-learning-based open-water-sea-ice-cloud discrimination over wintertime Antarctic sea ice using MODIS thermal-infrared imagery[J]. The Cryosphere, 2021, 15(3): 1551. DOI: 10.5194/tc-15-1551-2021
[137] Zhang Hongfang, Yao Xiaojun, Wei Qixin, et al. Comparison of lake ice extraction methods based on MODIS images[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4740. DOI: 10.3390/rs14194740
[138] Che Jiahang, Ding Minghu, Zhang Qinglin, et al. Reconstruction of near-surface air temperature over the Greenland ice sheet based on MODIS data and machine learning approaches[J]. Remote Sensing, 2022, 14(22): 5775. DOI: 10.3390/rs14225775
[139] Shimada R, Takeuchi N, Aoki T. Inter-annual and geographical variations in the extent of bare ice and dark ice on the Greenland ice sheet derived from MODIS satellite images[J/OL]. Frontiers in Earth Science, 2016: 4. DOI: 10.3389/feart.2016.00043
[140] Ludwig V, Spreen G, Pedersen L T. Evaluation of a new merged sea-ice concentration dataset at 1 km resolution from thermal infrared and passive microwave satellite data in the Arctic[J]. Remote Sensing, 2020, 12(19): 3183. DOI: 10.3390/rs12193183
[141] Hao Lu, Li Qingying, Pan Weichen, et al. Icing detection and evaluation of the electro-impulse de-icing system based on infrared images processing[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 109: 103424. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103424
[142] Wang Kun, Wang Guangjun, Chen Hong, et al. Quantitative identification of three-dimensional subsurface defect based on the fuzzy inference of thermal process[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 133: 903. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.149
[143] Li Qingying, Hao Lu, Pan Weichen, et al. Three-dimensional ice shape detection based on flash pulse infrared thermal wave testing[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2022, 36: 102196. DOI: 10.1016/j.csite.2022.102196
[144] Madi E, Pope K, Huang W. An integrated ice tracking and mitigation system on the stagnation line of a cylindrical surface based on thermal imaging and electro-thermal elements[J]. Measurement, 2022, 199: 111539. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111539
[145] Flinn E D, 李玲. 红外摄象机探测飞机化冰状况[J]. 红外, 1997(12): 31
Flinn E D, Li Ling. Infrared cameras monitor aircraft de-icing operations[J]. Infrared, 1997(12): 31
[146] Gómez M C Q, García M F P, Sánchez T J M. Ice detection using thermal infrared radiometry on wind turbine blades[J]. Measurement, 2016, 93: 157. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.06.064
[147] 周家纬, 李清英, 郝路, 等. 基于闪光脉冲红外热波检测技术的蒙皮外冰形分析[J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(6): 131
Zhou Jiawei, Li Qingying, Hao Lu, et al. Analysis of skin ice shape based on flash pulse infrared thermal wave detection technology[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(6): 131
[148] Troiano A, Pasero E, Mesin L. New system for detecting road ice formation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(3): 1091. DOI: 10.1109/TIM.2010.2064910
[149] Dean R N. A PCB sensor for detecting icing events[J]. IEEE Sensors Letters, 2021, 5(1): 1. DOI: 10.1109/LSENS.2020.3046947
[150] Zhu Yongcan, Huang Xinbo, Tian Yi, et al. Experimental study on the icing dielectric constant for the capacitive icing sensor[J]. Sensors, 2018, 18(10): 3325. DOI: 10.3390/s18103325
[151] 刘鹏飞. 输电线路覆冰检测及融冰技术研究[J]. 电力设备管理, 2025(5): 25
Liu Pengfei. Research on transmission line icing detection and ice melting technology[J]. Grid Operation, 2025(5): 25
[152] Dong Xuepeng, Han Lei, Gang Yiyin, et al. Design of road condition sensor based on multiple frequency detecting technology[J]. Key Engineering Materials, 2014, 3122(609): 937. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.609-610.937
[153] Zhi Xiang, Cho H C, Wang B, et al. Development of a capacitive ice sensor to measure ice growth in a real time[J]. Sensors, 2015, 15(3): 6688. DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2015.7181098
[154] Elzaidi A, Masek V, Muzychka Y. Phase discrimination in marine icing using a coplanar capacitive array[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(23): 11301. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2935616
[155] Flatscher M, Neumayer M, Bretterklieber T. Field sensor analysis for electrical impedance spectroscopy based ice detection[J]. 2017 IEEE SENSORS, 2017: 1. DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8234035
[156] Inanlu M J, Gurumukhi Y, Kabirzadeh P, et al. Capacitive sensing of frost growth dynamics on aluminum surfaces with different wettabilities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 225: 125377. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125377
[157] Ur R H, Naeem M A, Lazoglu I. Ice growth detection and the de-

icing using dual functional capacitive sensor[J]. Measurement, 2024, 237: 115208. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115208

[158] 周翼，郭玉东，桂康，等. 面向高能效电热除冰的冰结合状态感知方法研究[J]. 仪器仪表学报，2024，45(12)：24
Zhou Yi, Guo Yudong, Gui Kang, et al. Research on ice bonding state sensing method for energy-efficient electro-thermal de-icing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 24

[159] Altrabolsi M, Saleh M, Elhajj I H, et al. A planar capacitive sensor for detecting and measuring thickness and depth of oil under ice[J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(1): 015809. DOI: 10.1088/1361-6501/ad99ee

[160] Gui Kang, Liu Jinyi, Ge Junfeng, et al. Atmospheric icing process measurement utilizing impedance spectroscopy and thin film structure[J]. Measurement, 2022, 202: 111851. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.111851

[161] 蒋兴良，周文轩，董莉娜，等. 基于旋转圆柱三电极阵列的覆冰测量方法[J]. 电工技术学报，2024，39(5)：1524
Jiang Xingliang, Zhou Wenxuan, Dong Lina, et al. Research on icing measurement method based on rotating cylindrical three-electrode array [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1524

[162] 彭赛，谭爱国，王海文，等. 基于正交试验的叉指电极式覆冰监测传感器优化设计[J]. 电工电气，2025(1)：19
Peng Sai, Tan Aiguo, Wang Haiwen, et al. Optimization design of interdigitated electrode ice monitoring sensor based on orthogonal test[J]. Electrotechnics Electric, 2025(1): 19

[163] Owusu K P, Kuhn D C S, Bibeau E L. Capacitive probe for ice detection and accretion rate measurement: proof of concept[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 196. DOI: 10.1016/j.renene.2012.06.003

[164] Gui Kang, Bai Hongfei, Liu Ziyu, et al. Mixed phase measurement during icing process utilizing multi-wavelength interdigital sensor[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 242: 122491. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122491

[165] 李泽军，杜振宇，李子寅，等. 基于电容频率扫描法的机翼结冰实时探测系统[J]. 仪表技术与传感器，2023(8)：61
Li Zejun, Du Zhenyu, Li Ziying, et al. Real-time wing icing detection system based on capacitive frequency scanning method [J]. Instrument Technique and Sensor, 2023(8): 61

[166] Zhang Xin, Zhou Wensong, Li Hui. Electromechanical impedance-based ice detection of stay cables with temperature compensation [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(9). DOI: 10.1002/stc.2384

[167] Jiang Jingqi, Xu Gaobin, Wang Huanzhang, et al. High-accuracy road surface condition detection through multi-sensor information fusion based on WOA-BP neural network [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2024, 378: 115829. DOI: 10.1016/j.sna.2024.115829

[168] Zheng Dongsheng, Li Ziyin, Du Zhenyu, et al. Design of capacitance and impedance dual-parameters planar electrode sensor for thin ice detection of aircraft wings[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(11): 11006. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3169477

[169] Gui Kang, Bai Hongfei, Liu Ziyu, et al. Impedance ice sensor capable of self-componsating temperature drift[C]// 2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Harbin, 2023: 118. DOI: 10.1109/ICEMI59194.2023.10270421

[170] Abdelaal A, Sarayloo M, Nims D K, et al. A flexible surface-mountable sensor for ice detection and non-destructive measurement of liquid water content in snow[J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 195: 103469. DOI: 10.1016/j.coldregions.2021.103469

[171] Abie S M, Münch D, Bergli J. Monitoring electric impedance during freezing and thawing of saline and de-ionized water[J]. Journal of Electrical Bioimpedance, 2020, 11(1): 106. DOI: 10.2478/joeb-2020-0016

[172] 王瑞，于成刚，崔丽琴，等. 基于冰与水等效电阻值差异的冰情检测原理及其在河冰检测中的应用[J]. 数学的实践与认识，2015，45(11)：115
Wang Rui, Yu Chenggang, Cui Liqin, et al. The ice status measurement method based on the equivalent resistance difference among ice and water and its application in river ice cover measurements[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(11): 115

[173] 崔丽琴，秦建敏，张瑞锋. 基于空气、冰和水电阻特性差异进行河冰冰厚检测方法的研究[J]. 太原理工大学学报，2013，44(1)：5，13
Cui Liqin, Qin Jianming, Zhang Ruifeng. Study on physical measurements of river ice thickness based on the resistance difference of air, ice and water[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2013, 44(1): 5, 13

[174] Tabatabai H, Aljuboori M. A novel concrete-based sensor for detection of ice and water on roads and bridges[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2912. DOI: 10.3390/s17122912

[175] Dongo P D, Hakansson A, Stoeckel M A, et al. Detection of ice formation with the polymeric mixed ionic-electronic conductor PEDOT: PSS for aeronautics[J]. Advanced Electronic Materials, 2023, 9(12): 2300060. DOI: 10.1002/aelm.202300060

[176] Barsukov P O, Fainberg E B. Mapping bedrock topography and moraine deposits by transient electromagnetic sounding: Oslo graben, Norway[J]. Near Surface Geophysics, 2020, 18(2): 123. DOI: 10.1002/nsg.12070

[177] Jones K, Ingham M, Pringle D, et al. Cross-borehole resistivity tomography of Arctic and Antarctic sea ice[J]. Annals of Glaciology, 2011, 52(57): 161. DOI: 10.3189/172756411795931723

[178] Phillips M, Buchli C, Weber S, et al. Brief communication: combining borehole temperature, borehole piezometer and cross-borehole electrical resistivity tomography measurements to investigate seasonal changes in ice-rich mountain permafrost[J]. The Cryosphere, 2023, 17(2): 753. DOI: 10.5194/tc-17-753-2023

[179] Kristensen L, Juliussen H, Christiansen H H, et al. Structure and composition of a tidewater glacier push moraine, Svalbard, revealed by DC resistivity profiling[J]. Boreas, 2009, 38(1): 176. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2008.00045.x

[180] Mudler J, Hördt A, Przyklenk A, et al. Two-dimensional inversion of wideband spectral data from the capacitively coupled resistivity method-first applications in periglacial environments [J]. The Cryosphere, 2019, 13(9): 2439. DOI: 10.5194/tc-13-2439-2019

[181] Hoover G A. Aircraft ice detectors and related technologies for onground and inflight applications [M]. Springfield, Virginia: National Technical Information Service, 1993: 12

[182] Kim S, Sattorov M, Hong D, et al. Observing ice structure of micron-sized vapor-deposited ice with an X-ray free-electron laser [J]. Structural Dynamics, 2023, 10(4). DOI: 10.1063/4.0000185

[183] Myneni S, Luo Y, Näslund L Å, et al. Spectroscopic probing of local hydrogen-bonding structures in liquid water[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2002, 14(8): L213. DOI: 10.1088/0953 - 8984/14/8/106

[184] Cavalleri M, Ogasawara H, Pettersson L G M, et al. The interpretation of X-ray absorption spectra of water and ice[J]. Chemical Physics Letters, 2002, 364(3): 363. DOI: 10.1016/S0009 - 2614(02)00890 - 4

[185] 梁红, 宋晓燕, 刘宝林. 冷藏期间温度波动对牛肉冰晶增长的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(6): 193
Liang Hong, Song Xiaoyan, Liu Baolin. Effect of temperature on ice-crystal growth in frozen beef in cold-chain transportation[J]. Food and Fermentation Industries, 2016, 42(6): 193

[186] Kobayashi R, Kimizuka N, Watanabe M, et al. The effect of supercooling on ice structure in tuna meat observed by using X-ray computed tomography[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 60: 270. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2015.07.011

[187] Biesdorf J, Oberholzer P, Bernauer F, et al. Distinction of liquid water and ice based on dual spectrum neutron imaging[J]. ECS Transactions, 2013, 58(1): 309. DOI: 10.1149/05801.0309ecst

[188] Isegawa K, Setoyama D, Higuchi Y, et al. Fast phase differentiation between liquid-water and ice by pulsed neutron imaging with gated image intensifier[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1040: 167260. DOI: 10.1016/j.nima.2022.167260

[189] Santamaria A, Tang H Y, Park J W, et al. 3D neutron tomography of a polymer electrolyte membrane fuel cell under sub-zero conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(14): 10836. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.093

[190] Stahl P, Biesdorf J, Boillat P, et al. An investigation of PEFC sub-zero startup: influence of initial conditions and residual water[J]. Fuel Cells, 2017, 17(6): 778. DOI: 10.1002/fuce.201700033

[191] Siegwart M, Woracek R, Damián J I M, et al. Distinction between super-cooled water and ice with high duty cycle time-of-flight neutron imaging[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(10). DOI: 10.1063/1.5110288

[192] Wiltshire B, Mirshahidi K, Golovin K, et al. Robust and sensitive frost and ice detection via planar microwave resonator sensor[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 301: 126881. DOI: 10.1016/j.snb.2019.126881

[193] Luckasavitch K, Kozak R, Golovin K, et al. Magnetically coupled planar microwave resonators for real-time saltwater ice detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 333: 113245. DOI: 10.1016/j.sna.2021.113245

[194] Kozak R, Wiltshire B D, Khandoker M A R, et al. Modified microwave sensor with a patterned ground heater for detection and prevention of ice accumulation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(49): 55483. DOI: 10.1021/acsami.0c17173

[195] Shi Han, Zhen Zekang, Yu Sirui, et al. Experimental study on the technology optimization of clear ice thickness detection on horizontal cold plate surface by using microwave resonance[J]. Cold Regions Science and Technology, 2024, 228: 104308. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104308

[196] Shi Han, Song Mengjie, Ge Junfeng, et al. A high-precision saltwater ice thickness and salinity detection method based on capacitive coupled planar microwave resonator[J]. Cold Regions Science and Technology, 2025, 231: 104417. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104417

[197] Shi Han, Song Mengjie, Kim D R, et al. Experimental study on the location detection method of deionized water freezing front based on microwave resonance theory[J]. Measurement, 2025, 242: 115859. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115859

[198] Shi Han, Song Mengjie, Narita F, et al. Experimental study on high-precision detection technology for the freezing front height in brine on a horizontal cold plate surface in cold regions[J]. Renewable Energy, 2025, 246: 122928. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122928

[199] Shah A, Niksan O, Niknahad F, et al. Unlocking conformal microwave split ring resonant sensors for in-flight ice sensing[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(1): 525. DOI: 10.1109/TAES.2023.3328580

[200] Niksan O, Colegrave K, Zarifi M H. Battery-free, artificial neural network-assisted microwave resonator array for ice detection[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2023, 71(2): 698. DOI: 10.1109/TMTT.2022.3222194

[201] Niknahad F, Niksan O, Zarifi M H. Tunable microwave waveguide probe for noncontact ice detection on metallic surfaces[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(17): 27421. DOI: 10.1109/JSEN.2024.3425311

[202] Kozak R, Khorsand K, Zarifi T, et al. Patch antenna sensor for wireless ice and frost detection[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13707. DOI: 10.1038/s41598 - 021 - 93082 - 2

[203] Wagih M, Shi Junjie. Wireless ice detection and monitoring using flexible UHF RFID tags[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18715. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3087326

[204] Xie Jianbing, Wen Junjie, Chen Junwu, et al. Microwave icing sensor based on interdigital-complementary split-ring resonator[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(13): 12829. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3176932

[205] Tariq R U, Ye Ming, Zhao Xiaolong, et al. Microwave sensor for detection of ice accretion on base station antenna radome[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18733. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3089320

[206] Sallila H, Farrell S L, Mccurry J, et al. Assessment of contemporary satellite sea ice thickness products for Arctic sea ice[J]. The Cryosphere, 2019, 13(4): 1187. DOI: 10.5194/tc - 13 - 1187 - 2019

[207] 刘建强, 张颖, 石立坚, 等. 极地海冰观测卫星的发展现状与展望[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(6): 1339
Liu Jianqiang, Zhang Ying, Shi Lijian, et al. Status and prospect of satellite remote sensing of polar sea ice[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(6): 1339

[208] Zakhvatkina N, Smirnov V, Bychkova I. Satellite SAR data-based sea ice classification: an overview[J]. Geosciences, 2019, 9(4): 152. DOI: 10.3390/geosciences9040152

[209] Laforge A, Fleury S, Dinardo S, et al. Toward improved sea ice freeboard observation with SAR altimetry using the physical retracker SAMOSA + [J]. Advances in Space Research, 2021, 68(2): 732. DOI: 10.1016/j.asr.2020.02.001

[210] Ramjan S, Geldsetzer T, Scharien R, et al. Predicting melt pond fraction on landfast snow covered first year sea ice from winter C-Band SAR backscatter utilizing linear, polarimetric and texture parameters[J]. Remote Sensing, 2018, 10(10): 1603. DOI: 10.3390/rs10101603

[211] Arkett M, Flett D, De Abreu R, et al. Sea ice type and open water discrimination for operational ice monitoring with RADARSAT-2 [J]. 2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, 2006: 1631. DOI: 10.1109/IGARSS.2006.421

[212] Leigh S, Wang Z, Clausi D A. Automated ice-water classification using dual polarization SAR satellite imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(9): 5529. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2290231

[213] Ressel R, Singha S, Lehner S, et al. Investigation into different polarimetric features for sea ice classification using X-band synthetic aperture radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9(7): 3131. DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2539501

[214] Khaleghian S, Ullah H, Kræmer T, et al. Sea ice classification of SAR imagery based on convolution neural networks[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1734. DOI: 10.3390/rs13091734

[215] Komarov A S, Buehner M. Adaptive probability thresholding in automated ice and open water detection from RADARSAT-2 images [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 552. DOI: 10.1109/LGRS.2018.2806189

[216] Komarov A, Barber D. Detection of sea ice motion from co- and cross-polarization RADARSAT-2 images [J]. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012: 3277. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6350604

[217] Karvonen J, Simila M, Makynen M. Open water detection from Baltic Sea ice Radarsat-1 SAR imagery[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(3): 275. DOI: 10.1109/LGRS.2005.847930

[218] Lu Yiru, Zhang Biao, Perrie W. Arctic sea ice and open water classification from spaceborne fully polarimetric synthetic aperture radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1. DOI: 10.1109/tgrs.2023.3266158

[219] Geldsetzer T, Yackel J, Tomar K S, et al. Melt pond detection on landfast sea ice using dual co-polarized Ku-band backscatter[J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 296: 113725. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113725

[220] Munoz-Martin J F, Rodriguez-Alvarez N, Bosch-Lluis X, et al. Integrated retrieval of sea-ice salinity, density, and thickness using polarimetric GNSS-R[J]. Remote Sensing of Environment, 2025, 318: 114617. DOI: 10.1016/j.rse.2025.114617

[221] Friedl P, Weiser F, Fluhrer A, et al. Remote sensing of glacier and ice sheet grounding lines: a review [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 201: 102948. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102948

[222] Lee S M, Sohn B J, Kim S J. Differentiating between first-year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave-retrieved ice emissivities[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(10): 5097. DOI: 10.1002/2016JD026275

[223] Mäkynen M, Similä M. AMSR2 thin ice detection algorithm for the arctic winter conditions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3142966

[224] Shokr M, Lambe A, Agnew T. A new algorithm (ECICE) to estimate ice concentration from remote sensing observations: an application to 85-GHz passive microwave data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(12): 4104. DOI: 10.1109/TGRS.2008.2000624

[225] Carret A, Fleury S, Di B A, et al. A multi-frequency altimetry snow depth product over Arctic sea ice[J]. Scientific Data, 2025, 12(1): 104. DOI: 10.1038/s41597-024-04343-4

[226] Wang Xingdong, Guo Zhi, Zhang Haowei, et al. Snowmelt detection in Greenland ice sheet based on AMSR2 89GHz[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 212: 103885. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103885

[227] Wang Xingdong, Guo Zhi, Zhang Haowei, et al. Snowmelt detection on the Antarctic ice sheet and ice shelves based on AMSR2 89 GHz channels[J]. Ecological Indicators, 2023, 153: 110403. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110403

[228] Zhang Zhilun, Yu Yining, Li Xinqing, et al. Arctic sea ice classification using microwave scatterometer and radiometer data during 2002—2017 [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(8): 5319. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2898872

[229] Cui Liqin, Qin Jianmin, Deng Xiao. Freshwater ice thickness apparatus based on differences in electrical resistance and temperature[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 37. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.07.009

[230] Siegwart M, Huang F, Cochet M, et al. Time-of-flight neutron imaging for the distinction of super-cooled water and ice during PEFC cold-starts[J]. ECS Meeting Abstracts, 2018, MA2018-02(41): 1378. DOI: 10.1149/ma2018-02/41/1378

[231] Higuchi Y, Setoyama D, Isegawa K, et al. Pulsed neutron imaging for differentiation of ice and liquid water towards fuel cell vehicle applications[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2021, 23(2): 1062. DOI: 10.1039/d0cp03887c

[232] 刘辉，冀鸿兰，罗红春，等. 无人机载雷达在冰厚及冰层结构探测中的应用[J]. 排灌机械工程学报，2021，39(6)：630
Liu Hui, Ji Honglan, Luo Hongchun, et al. Application of UAV radar in survey of ice thickness and ice structure[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(6): 630

[233] 崔祥斌，孙波，田钢，等. 东南极 Dome A 冰雷达探测:冰厚分布和冰下地形[J]. 科学通报，2010，55(3)：268
Cui Xiangbin, Sun Bo, Tian Gang, et al. Ice radar investigation at Dome A, East Antarctica: ice thickness and subglacial topography[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(3): 268

[234] Jin Huian, Yao Xiaojun, Wei Qixin, et al. Ice thickness assessment of Non-Freshwater Lakes in the Qinghai-Tibetan Plateau based on unmanned aerial vehicle-borne ice-penetrating radar: a case study of Qinghai Lake and Gahai Lake[J]. Remote Sensing, 2024, 16(6): 959. DOI: 10.3390/rs16060959

[235] Dawson G, Landy J, Tsamados M, et al. A 10-year record of Arctic summer sea ice freeboard from CryoSat-2 [J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 268: 112744. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112744

[236] 王华，王以伦，张滨华. 基于磁致伸缩原理的结冰传感器设计理论[J]. 电工技术学报，2003(6)：77
Wang Hua, Wang Yilun, Zhang Binhua. Theory of designing ice detector based on magnetostriction [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003(6): 77

[237] Mäder T, Nestler M, Kranz B, et al. Studies on sheet-metal compounds with piezoceramic modules for icing detection and de-icing[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(12): 1800589. DOI: 10.1002/adem.201800589

[238] Palanque V, Pothin J, Pommier-Budinger V, et al. Piezoelectric resonant ice protection systems-Part 1/2: prediction of power requirement for de-icing a NACA 0024 leading edge[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(3): 92. DOI: 10.1016/j.cja.

2024.01.001

[239] Palanque V, Planès T, Pommier-Budinger V, et al. Piezoelectric resonant ice protection systems Part 2/2: evaluation of benefits at aircraft level [J/OL]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024. DOI: 10.1016/j.cja.2024.03.021

[240] 王华, 聂丽梅, 赵萍. 结冰传感器数学模型的建立和验证[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(12): 63
Wang Hua, Nie Limei, Zhao Ping. Establishment and analysis of mathematic model for ice sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(12): 63

[241] 王国柱, 葛俊锋, 桂康, 等. 谐振式结冰状态传感器的分析与建模[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(7): 117
Wang Guozhu, Ge Junfeng, Gui Kang, et al. Analysis and modeling of resonant icing status sensor[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(7): 117

[242] 张滨华, 王华, 王劲松, 等. 一种基于振动原理的结冰探测方法[J]. 仪器仪表学报, 2003(4): 384
Zhang Binhua, Wang Hua, Wang Jinsong, et al. A method for ice detecting based on the principle of vibration[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003(4): 384

[243] Shi Qiang, Wang Junbo, Chen Deyong, et al. A flush-mounted resonant ice detection sensor with high sensitivity [J]. Key Engineering Materials, 2012, 503: 81. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.503.81

[244] 甘茂锐, 丁力, 张进. 某型航空发动机结冰检测技术仿真和验证研究[J]. 传感器世界, 2022, 28(5): 7
Gan Maorui, Ding Li, Zhang Jin. Simulation and verification of icing detection technology for an aeroengine[J]. Sensor World, 2022, 28(5): 7

[245] 赵云行, 桂康, 杜卫超, 等. 动车组列车结冰状态传感器原理及试验研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(10): 60
Zhao Yunxing, Gui Kang, Du Weichao, et al. Principle and experimental study of icing condition sensor for EMU train[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10): 60

[246] 张杰, 王敏, 张洪, 等. 谐振平膜型结冰传感器的智能温度补偿[J]. 计量与测试技术, 2005(8): 4
Zhang Jie, Wang Min, Zhang Hong, et al. Intelligent temperature compensation of resonant diaphragm [J]. Metrology & Measurement Technique, 2005(8): 4

[247] 李航航, 周敏. 飞机结冰探测技术及防除冰系统工程应用[J]. 航空工程进展, 2010, 1(2): 112
Li Hanghang, Zhou Min. Engineering application of icing detection technique and anti-icing and deicing system on aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2010, 1(2): 112

[248] Swytink-Binnema N, Godreau C, Arbez C. Detecting instrumental icing using automated double anemometry [J]. Wind Energy, 2019, 22(1): 80. DOI: 10.1002/we.2271

[249] Tammelin B, Böhringer A, Cavaliere M, et al. Wind energy production in cold climate (WECO) [R]. Helsinki: Finnish Meteorological Institute, 2000

[250] 郑若楠. 数据驱动的风电机组叶片结冰在线检测方法[J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 1
Zheng Ruonan. On-line detection method of ice on wind turbine blade driven by data[J]. Distributed Energy, 2019, 4(1): 1

[251] Heyn H M, Blanke M, Skjetne R. Ice condition assessment using onboard accelerometers and statistical change detection[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020, 45(3): 898. DOI: 10.1109/JOE.2019.2899473

[252] Ye Feng, Ezzat A A. Icing detection and prediction for wind turbines using multivariate sensor data and machine learning[J]. Renewable Energy, 2024, 231: 120879. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120879

[253] Guo Peng, Infield D. Wind turbine blade icing detection with multi-model collaborative monitoring method [J]. Renewable Energy, 2021, 179: 1098. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.120

[254] 李宁波, 闫涛, 李乃鹏, 等. 基于 SCADA 数据的风机叶片结冰检测方法[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 58
Li Ningbo, Yan Tao, Li Naipeng, et al. Ice detection method by using SCADA data on wind turbine blades[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(1): 58

[255] 沈贺, 张福鹏, 李岩, 等. 风力机叶片翼型前缘结冰分布特征风洞试验[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 577
Sheng He, Zhang Fupeng, Li Yan, et al. Wind tunnel experiment on icing distribution characteristics at leading edge of wind turbine blades[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(5): 577

[256] Purcell E, Nejad A R, Bekker A. Detection of ice using ship propulsion and navigation measurements[J]. Ocean Engineering, 2023, 273: 113992. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113992

[257] Chen Liang, Huang Changhai, Wang Yanhao. A study on the correlation between ship movement characteristics and ice conditions in polar waters [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(4): 729. DOI: 10.3390/jmse11040729

[258] Xu Feng, Li Danyu, Gao Peng, et al. Numerical simulation of two-dimensional transmission line icing and analysis of factors that influence icing[J]. Journal of Fluids and Structures, 2023, 118: 103858. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2023.103858

[259] Chen Qinghao, Liu Tianyu, Wang Zhangqi, et al. Research on monitoring method for ice-covered state of transmission lines based on conductor end displacement [J]. Electric Power Systems Research, 2024, 236: 110918. DOI: 10.1016/j.epsr.2024.110918

[260] 张亚博, 毛俊伟, 葛俊锋, 等. 基于压电阵列的结冰三维成像方法研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(6): 51
Zhang Yabo, Mao Junwei, Ge Junfeng, et al. Research on 3D imaging method of icing based on piezoelectric array [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(6): 51

[261] Korczewski Z, Rudnicki J. Active diagnostic experimentation on wind turbine blades with vibration measurements and analysis[J]. Polish Maritime Research, 2024, 31(3): 126. DOI: 10.2478/pomr-2024-0042

[262] Gui Kang, Ye Lin, Ge Junfeng, et al. Road surface condition detection utilizing resonance frequency and optical technologies [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 297: 111540. DOI: 10.1016/j.sna.2019.111540

[263] 谭舒亚, 葛俊锋, 叶林, 等. 基于多传感器的路面结冰检测系统[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(1): 107
Tan Shuya, Ge Junfeng, Ye Lin, et al. Road surface icing detecting system based on multiple sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(1): 107

(编辑 刘 彤)