

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-134-08

基于霜层测量的空气源热泵除霜技术研究进展

边雅丽¹ 马国远¹ 曹瑞林² 杜 锐¹ 许树学¹

(1. 北京工业大学 北京 100124; 2. 中国家用电器研究院 北京 100037)

【摘 要】 空气源热泵的高效除霜是技术难题, 准确测量霜层厚度可为除霜控制提供最可靠依据。总结和分析了现有基于霜层测量的除霜技术手段, 包括数字千分尺、游标尺、扫描探针显微镜、激光测厚、中子射线、光电转换、传感器、图像处理、声学信号和人工智能等, 对其各自优势及局限性进行了比较分析, 为今后空气源热泵基于霜层测量的除霜控制研究提供参考。

【关键词】 空气源热泵; 除霜控制; 霜层

中图分类号 TB61 文献标志码 A

Research Progress of Air Source Heat Pump Defrosting Technology Based on Frost Layer Measurement

Bian Yali¹ Ma Guoyuan¹ Cao Ruilin² Du Kun¹ Xu Shuxue¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing, 100124;

2. China Household Electric Appliance Research Institute, Beijing, 100037)

【Abstract】 The efficient defrosting of air-source heat pump is a technical problem, and accurate measurement of frost layer thickness can provide the most reliable basis for the selection of defrost control points. This paper summarizes and analyzes the existing defrost control methods based on frost layer measurement, including digital micrometer, vernier ruler, scanning probe microscope, laser thickness measurement, neutron ray, photoelectric conversion, sensor, image processing, acoustic signal and artificial intelligence. Its advantages and limitations are compared and analyzed, which provides a reference for the future research direction of defrost control methods based on frost layer measurement.

【Keywords】 air source heat pump; defrost control; frost layer

0 引言

空气源热泵具有高效节能环保的优点, 广泛用于建筑采暖和热水供应。近年来, 空气源热泵的研究在低温领域取得了显著进展, 现已实现-30℃环境下的制热运行^[1,2]。空气源热泵在低温高湿工况下运行容易结霜, 霜冻的积累降低制热量, 进而影响室内热舒适性, 甚至会造成机组损坏^[3]。研究表明, 结霜时空气源热泵的性能系数降低 35—60%, 制热能力降低 30—57%^[4-6]。因此需要监控系统运行参数, 测量室外换热器结霜情况进行除霜操作。

然而, 准确判断结霜及高效除霜仍是技术难题^[7], 根据监控参数的不同, 现有除霜控制方法可分为间接测量和直接测量。间接测量监控温度、压力、湿度等参数判断室外换热器的结霜程度, 进而控制除霜。主要有温差除霜控制法^[8], 温度时间除霜控制法^[9], 空气压差除霜控制法^[10], 最大平均供热能力除霜控制法^[11], 自适应模糊控制法^[12]等。结霜是一个动态传热传质的复杂过程, 因此实际结霜程度难以准确预测^[13]。冯颖超发现在北京的供暖季, 约 68%的除霜是不必要的^[14]。为实现按需除霜, 有学者试图开发直接测量霜层的除霜控制方法。使

作者简介: 边雅丽 (2000.08-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: byl20200310@163.com

通讯作者: 许树学 (1981.08-), 男, 博士, 副研究员, E-mail: xsx@bjut.edu.cn

收稿日期: 2023-09-18

用相关设备直接测量霜层的厚度及形态,分为接触式和非接触式测量。接触式测量利用数字千分尺、游标尺、扫描探针显微镜等设备直接获得霜层厚度;非接触式测量包括激光测厚、中子射线、光电转换、传感器、图像处理、声学信号和人工智能等。直接测量霜层能精准确定除霜启停的控制点,实现按需除霜。

本文总结和分析了现有基于霜层测量的除霜控制方法,对其各自的优势和局限性进行比较分析,为今后基于霜层测量的除霜控制研究提供参考。

1 接触式测量

利用数字千分尺、游标尺和扫描探针显微镜等仪器直接测量霜层厚度。

1.1 数字千分尺

该方法测量蒸发器上某点结霜前/后的表面距离,计算差值得到霜层厚度。Biguria^[15]于 1970 年提出垂直单点测量霜层的方法, Sengupta 等^[16]于 1998 年使用并报道了这一方法。他们设计了一种由测角望远镜组成的光学装置,该望远镜可在标尺上垂直移动,初始读数和最终读数的差值即为霜层厚度。Lee 同样使用了该方法^[17-20],并使用数字千分尺替代望远镜等光学装置。Barzanoni 等^[21]在实验中利用数字千分尺的微测头,测量和计算霜层厚度,如图 1 所示。数字千分尺测量精度较低,过程会影响结霜,破坏表面霜层状况。实际运行中蒸发器表面结霜不均匀,该方法仅测量某点的霜层厚度,难以反映整个霜层。目前该方法仅适用于实验室的霜层测量,难以推广应用。

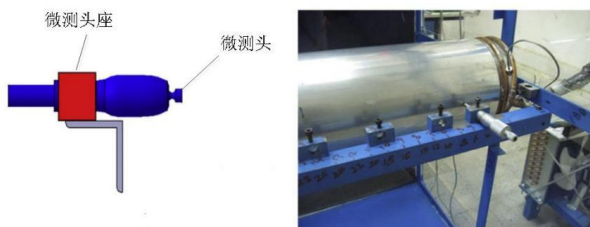


图 1 数字千分尺结构示意图

Fig.1 Digital micrometer structure diagram

1.2 游标尺

Kandula M^[22]提出使用精密游标卡尺测量霜层厚度的方法。分别在铝板上的五个位置测量霜层厚度,一个测点位于铝板中心,其余四个测点均匀分

布在四周,计算五个测量点的平均值作为霜层厚度。与数字千分尺相比,游标尺测量精度更高,将 5 个测点的平均值作为霜层厚度,更能反映整个测试表面的结霜情况,但不能实时反映测试表面的结霜状况。电极的极性和游标卡尺的测量过程可能会影响结霜,破坏霜层表面结构,该方法在实际中的应用也不广泛。

1.3 扫描探针显微镜

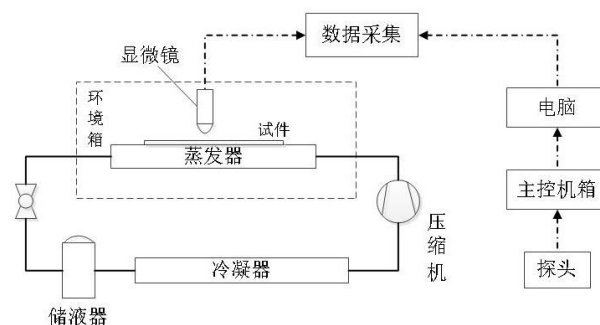


图 2 实验装置示意简图

Fig.2 Schematic diagram of experimental device

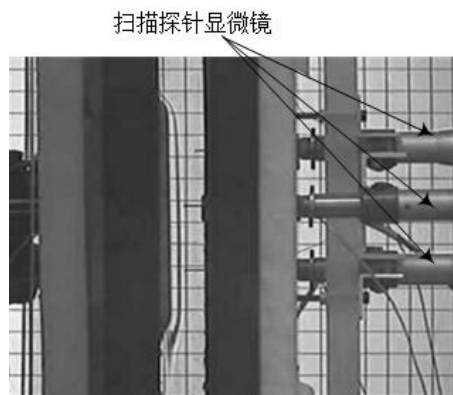


图 3 试验截面的典型纹影图像

Fig.3 Typical schlieren image of the test section

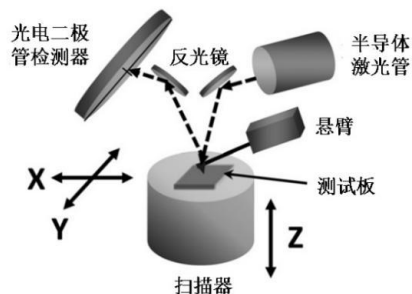


图 4 扫描探针显微镜的工作原理

Fig.4 The working principle of scanning probe microscope

扫描探针显微镜^[23-25]是利用探针和霜层原子

的相互作用，得到霜层表面三维图像。通过后处理软件对图像进行平均滤波和曲面拟合校正，分析得到测试表面的霜层高度、表面粗糙度等。张海英等^[27]利用原子力显微镜对结霜表面进行检测，图 2 为实验装置示意图。Marco Fossa 等^[26]提出了两种特殊情况下的替代技术：将一对紧密间隔的电极用作阻抗传感器，消除热电偶的结点；当霜层存在易碎结构时，探针尖端用尼龙帽覆盖，防止霜冻融化。图 3 指出了用于测量霜层厚度的三个扫描探针显微镜。松本等^[27,28]利用光杠杆方法检测表面和探针之间的各种相互作用，如图 4 所示。或者采用动态模式，霜冻和探头尖端间歇性接触，垂直方向上的位移即为霜层厚度。

扫描探针显微镜可采集多条线的霜层厚度，平均值更接近于整个霜层的平均厚度。但耗时较长，霜层厚度动态变化导致测量存在误差。此外，在测量过程中，探头会破坏霜层晶体。因此虽一定程度提高了测量精度，但仍无法达到精准除霜的要求，同时由于探头成本高，难以广泛应用。

2 非接触式测量

2.1 激光测厚

利用两个激光位移传感器上下对射，分别测量霜层上/下表面的位置，计算得到霜层厚度。激光测量分为两种：衍射法和干涉法。衍射法的工作原理是在结霜表面和参考表面之间存在一个空间，光束穿过时产生衍射条纹。霜冻形成后空间改变，衍射条纹的位置随之变化，据此计算出霜层厚度。董金昌^[29]等针对激光衍射做了详细的理论推导和实验测定，结果表明该技术可准确测定蒸发器表面结霜速率，动态监测蒸发器表面结霜工况。干涉法利用反射镜将激光分成两束：测量信号和参考信号，如图 5 所示。激光干涉仪检测两束激光的相位差，计算得到霜层厚度。Kaiyang Qu^[30]等采用激光束干涉技术，同时利用 CCD 相机观测霜层表面形貌，间接观测到霜层厚度的增加过程。Besant^[31]使用低功率激光和灵敏光度计来测量霜厚，实际测量的霜厚在重复实验中出现分散。激光测厚是非接触式测量，对霜层影响较小，具有精度和测量速度方面的优势。可以测量微米级距离，精度达到 0.001mm；测量速度可达到每秒上千次，采样间隔短至 0.001 秒。然而，激光测厚中实验装置受到温度影响，需

定期校准。当霜层表面空洞过大时，入射激光不能有效反射，可能导致测量失败。

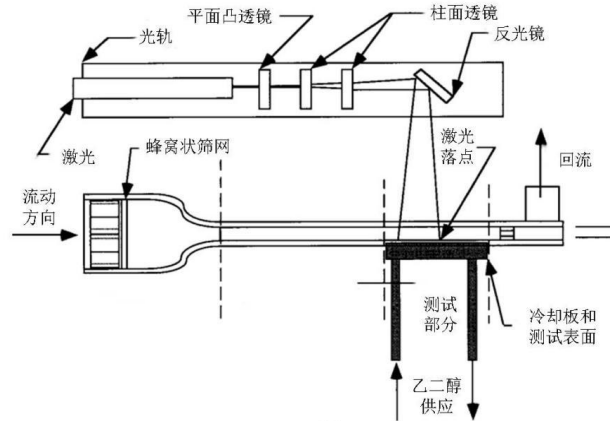


图 5 激光测厚原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of laser thickness measurement

2.2 中子射线

中子射线法^[32]利用中子对于不同物质的衰减率差异识别霜冻，能对换热器表面结霜情况进行评价。中子遇水产生强烈的质量衰减，而对于铝的质量衰减仅为水的 1/100。向结霜的铝片管换热器照射中子，中子相对于铝不会衰减，而是由霜层中的水分子强烈衰减。该方法实验装置包括：中子束、变频装置、结霜实验装置，如图 6 所示。变频装置将翅片管表面的霜冻转换为照片，分析得到霜层厚度和分布状况等，因此可对结霜情况进行定量分析。此外，该系统可定量测量翅片管周围的水分及湿空气分布。与上述激光测量确定某点的霜层厚度不同，该方法直接获得霜层形成数据，可准确计算出平均霜层厚度。但由于其成本高、不方便中子照相、占地面积大等缺点，使得该方法在结霜和除霜应用中受到限制。

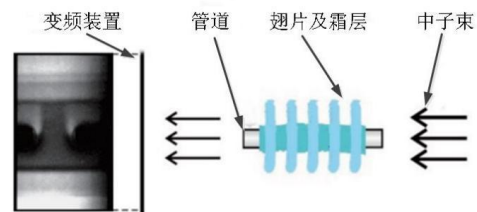


图 6 中子射线测厚原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of neutron ray thickness measurement

2.3 光电转换

常见的光电传感器由发射器和接收器组成。在

电流驱动下, 发射器发射恒定红外线, 接收器吸收红外能量并将其转换为电流。光束对于霜层的感知极为灵敏, 并且电压增长与霜层厚度呈正比, 因此该技术可应用在空气源热泵的除霜控制。Wei Wang 等^[33]提出一种新型的“管环光电传感器”, 如图 7 所示。该方法可减少不必要的除霜周期, 加热效率提高到 92.6%, COP 提高到 2.85。肖婧^[34]认为当输入电流强度增大至 15mA 以上, 且在测点处附加遮光装置, 可有效屏蔽外界因素干扰。现场跟踪测试发现, 该技术在低温、雨雪、雾气等极端条件下仍具备工程实用性。Xiaoxia Bai 等^[35]通过现场试验证明, 该方法比温度-时间法的制热效率高, COP 和供热能力分别提高了 3%和 12.1%。Yijing Ge 等^[36]在北京的两个供暖季进行现场试验, 表明该方法具有良好的重复性。光电转换可以反映换热器表面结霜的整体情况, 精准判定霜层厚度。光电传感器体积小、价格低、操作简单, 经大量现场试验证明, 该技术可以在各种恶劣条件下稳定工作。其后续研究应集中于传感器的最佳分布和位置。

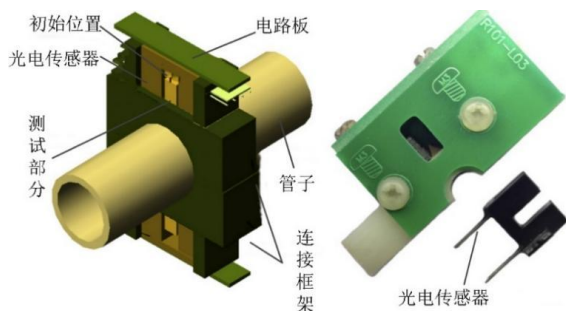


图 7 “管环光电传感器”结构示意图

Fig.7 Structure diagram of "tube photoelectric sensor"

2.4 其他传感器技术

传感器尺寸在结霜检测中具有优势, 特别是其小尺寸化能减少换热器上的气流扰动。提高传感器精度降低其价格, 对于空气源热泵的除霜控制是可行的解决方案。

2.4.1 电容传感

电容传感^[37]是利用一种基于边缘效应的数显电极对, 检测不同的电容信号值判断结霜状况。传感器由模数转换器、连接器和电极组成, 如图 8 所示。连接器将信号从电极传输到转换器, 转换器输出相应的电容读数得到霜层的介电常数。根据 Maxwell-Garnett 的理论, 通过二元混合物的介电常数求得霜层各组份体积比例。Shen^[37]等利用电容传

感的方法, 实时监测霜孔隙度来确定霜层生长情况, 与测量霜质量和体积的平均方法进行比较。结果表明电容传感对海绵孔隙度的检测与其他方法的最大偏差小于 19%, 实测孔隙度与理论预测值相差小于 ±12%。电容传感与平均法测得的霜孔隙度吻合良好, 不同电极配置的传感器得到的孔隙度读数分布均匀, 最大偏差小于 3%。

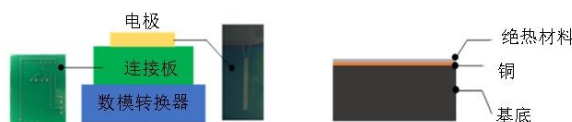


图 8 电容传感器示意图

Fig.8 Capacitance sensor diagram

2.4.2 电阻传感

由于空气、水和冰具有完全不同的电阻值, 因此可通过测量翅片两端的电压降, 确定蒸发器表面的结霜情况。电阻传感器放置于换热器的翅片之间, 对其终端施加电压, 霜冻出现时传感器可以捕捉到电压降的变化。当翅片表面有水凝结时, 将检测到特征电压降; 结霜时电压降增加, 随着水的蒸发电压降将进一步增加。Aguiar^[38]发现电极之间的介质对传感器的精度和可靠性有重要影响。织物介质可为电阻传感器增加电绝缘, 减少由电极彼此接触引起的误差。棉织物作为介质时, 除霜工作曲线更平滑, 根据曲线的形状可区分结/除霜状态。但棉花会造成传感器端热绝缘, 影响检测的精度。

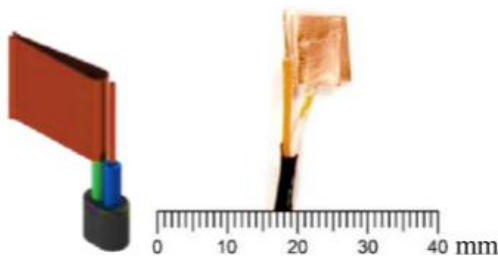


图 9 电阻传感器示意图

Fig.9 Resistance sensor diagram

2.4.3 平面微波谐振传感器

该传感器的工作原理是输入信号和附近材料之间的电磁波相互作用, 该技术采用非接触的方式提取电子信号。传感器根据散射参数中测量的谐振频率、振幅和质量因子变化来区分水、霜和冰。Wiltshire 等^[39]设计了一款安装在平面基板上的微波谐振传感器, 工作在 3.5—5GHz 之间, 谐振振幅

-14.5db, 质量因子为 250。当有水凝结或结霜时, 该传感器可以检测到谐振频率、振幅和质量因子的变化。而这些变化是由于结霜后, 谐振腔周围的局部介电常数发生变化, 传感器通过不同的响应速率区分凝结水和霜冻。这种传感器价格低、灵活, 可以在 15s 内快速准确的检测结霜, 在潮湿和低于 0℃ 的环境下, 仍可通过校准温度的影响准确检测到霜冻。

2.5 图像处理

图像处理通过对获得的结霜图像进行分析, 定量评价结霜程度。预处理增强图像的视觉质量, 提高程序识别能力, 采用灰度转换和阈值分割技术对霜冻视觉特征进行量化, 将图像划分为: 无霜区、中霜区和重霜区。殷大桢^[40]将分形维数稳定点作为除霜开始点, 无霜稳定点为终止点, 利用算法分析

结霜图像所处状态, 建立了使用图像分析除霜控制点的理论控制逻辑。Zhaoyang Li 等^[41]从拍摄角度、光照水平等对其适用性进行了一系列实验, 改进后的新型结霜探测方法考虑照度变化对图像识别精度的影响。韩勇^[42]引入了系数 P 来表征翅片表面结霜的程度, 量化除霜控制的要求, 将 P 值为 0.5 和 0.08 分别作为除霜启停的判定条件。王世权等^[43]提出一种面源补偿光照的方法, 选择基准照度面源, 利用结霜阈值修正系数补偿光照环境影响。图像处理技术具有简单、成本低、可实现自动化操作等优点, 能够较好地考虑不同照度对图像识别应用于结霜检测精度的影响, 在实际运行中对空气源热泵的除霜控制精确。

综合以上内容, 将接触式和非接触式除霜控制方法比较结果整理在表 1 中。

表 1 接触式和非接触式除霜控制方法

Table1 Contact and non-contact defrost control methods

测量方式	类型	测量方式	准确性	成本	便捷性	结霜影响程度
数字千分尺	接触式	单/多点测量	低	低	否	严重
游标尺	接触式	多点测量	低	低	否	严重
扫描探针显微镜	接触式	线性测量	高	高	否	中等
激光测厚	非接触式	多点测量	高	高	否	轻微
中子射线	非接触式	空间测量	高	高	否	轻微
光电转换	非接触式	空间测量	高	低	是	无
传感器技术	非接触式	空间测量	高	低	是	无
图像识别	非接触式	面测量	高	中	是	无

3 除霜控制的优化

3.1 光电和电容传感

混合探测除霜系统^[44]将光电传感和电容传感相结合控制除霜, 同时考虑两个模块的输出, 监测并量化蒸发器表面的霜层总厚度。达到临界厚度时, 系统触发除霜模块。控制器监控光电传感的输出电压判断蒸发器结霜状态: 变化 0.2V 时表示出现霜冻; 此时蒸发器表面可能是凝结水和霜的混合物。因此控制器等待 120s, 凝结水完全结霜后, 电容传感模块启动监测结霜厚度, 达到临界值时控制器关闭压缩机, 进入除霜模块。随着霜冻的融化, 控制器监测光电传感输出电压的变化值, 达到临界值时触发除霜模块关闭。压缩机延迟 120s 后开启, 确保融水排净, 防止再次结冰。该系统的霜冻检测

范围为 1.3—8mm, 误差范围为 5%。当达到临界霜厚时触发除霜, 该除霜阈值可根据实际需要进行调整。同时该系统非常灵活, 光电和电容传感模块可根据需要应用特定几何形状。

3.2 声学信号和人工智能

Andrade-Ambriz 等^[45]提出利用声学信号和人工智能来估计积霜量。由于蒸发器表面霜层为多孔介质, 声音信号与其发生相互作用时, 高频声波会被吸收, 低频声波被其反射。蒸发器表面积霜量越多, 声信号的相互作用越大, 因此声波信号可用来精确计算霜层厚度。该方法所提出的神经网络的结构有 10 个输入神经元、隐藏层有 27 个神经元, 并且包含有 4 个神经元的输出层, 分别代表无霜、微霜、中霜、重霜四种霜冻积累水平, 利用该神经网络

络对蒸发器内的积霜量进行计算。分别使用多层神经网络和概率神经网络,通过混淆矩阵比较积霜类别的实际值与分类器预测值,两种智能模型的总体准确率均为94%。结果表明,该模型适用于计算资源有限的地区,同时在估算积霜方面具有较好的性能;通过人工智能的快速训练,可以在保证精确的同时迅速估计出积霜量。

3.3 电阻传感与图像识别

Martim Aguiar 等^[46]在传感器识别霜冻的基础上,扩展使用计算机的图像识别,将传感器的结果与实际霜冻图像进行比较,跟踪绘制传感器检测结霜形成曲线。将电阻传感器测量数据与实际霜冻形成之间进行交叉,确保除霜精度。通过摄像机捕捉对应时刻的图像证实了电阻传感器的测量结果,将捕捉到的图像利用阈值法转化为二值图像,不同于灰度图像中像素值在0—255之间,二值图像的值只有0和1。由于换热器上不均匀结霜,在霜冻快速形成的区域,霜冻探测在理想的除霜时间之前进行,而在霜冻缓慢形成的区域,霜冻探测落后于理想的除霜时间。与图像识别技术的结合可以建立一个结霜分布图像,将该数据与其他传感器的数据交叉分析。根据结霜图,可将传感器布置在最佳位置,实现精准除霜。

3.4 卷积神经网络与图像识别

针对不同的运行环境,建立高精度的图像识别模型需要耗费大量的人力和成本,不同设备可扩展性低。为此Chen 等^[47]提出了一种基于深度学习的图像识别方法,为实现按需除霜控制提供了新思路。利用卷积神经网络(CNN)模型,可以提供深刻复杂的特征识别霜层。通过图像聚类进行深度分类归并,并利用仿射变换、颜色失真、模糊和标准化等步骤进行图像增强,去除共同特征,强调个体差异。将霜冻图像作为CNN模型输入,计算各霜冻级别的概率。该模型利用有限的霜冻图像,识别精度可达到95.92%,相比于传统CNN模型提高5.50%。对网络框架和训练参数进行超参数优化,除霜频率、累计时间和能耗分别降低了31.68%、65.83%和42.92%。此外,该控制方法可以避免模式频繁切换和超温运行,保证商业能源系统安全运行。

4 结论

霜层厚度是影响空气源热泵性能最重要、最直

接的因素,若能准确测量可为除霜控制点的选择提供可靠依据。本文总结分析了基于霜层测量的空气源热泵除霜控制方法,对其优势和局限性进行了比较分析,并为其今后的研究方向提供参考,主要结论如下:

(1) 接触式测量技术利用实验装置直接测得霜层厚度,将点/线测量得到的局部霜厚作为除霜控制点,精度低,测量过程对霜面产生影响。设备成本高昂、操作复杂,多用于实验室测量。

(2) 非接触式测量技术不与霜层发生接触,能避免对霜层的影响,精度高。其中传感器具有体积小、价格低等优点。今后的研究工作应集中于传感器的最佳分布位置,同时避免由于温度影响造成的测量误差。开展吸收性、电绝缘以及良热导性的介质(陶瓷等)的研究,对电阻传感器的优化极具研究价值。

(3) 图像处理成本低、精度高、操作简单,今后应重点研究拍摄角度、光照条件、像素等对除霜的影响。图像处理与人工智能模型相结合,经过算法的聚类整合,降低了人力、时间成本,提高了除霜控制系统的准确性,除霜频率、累计时间和能耗等大幅度降低,今后的研究重点可集中于算法模型的改进,进一步推动除霜控制方法的发展。

参考文献:

- [1] 王洋浩,马龙霞,王志华,等.空气源热泵除霜控制方法研究现状及展望[J].制冷学报,2021,42(5):27-35.
- [2] Wu C, Liu F, Li X, et al. Low-temperature air source heat pump system for heating in severely cold area: Long-term applicability evaluation[J]. Building and Environment, 2022,208:108594.
- [3] Yang D, Lee K, Song S. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006,49(7):1472-1479.
- [4] Guo X, Chen Y, Wang W, et al. Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system[J]. Applied Thermal Engineering, 2008,28(17):2267-2278.
- [5] Wang W, Guo Q C, Feng Y C, et al. Theoretical study on the critical heat and mass transfer characteristics of a frosting tube[J]. Applied Thermal Engineering, 2013,

- 54(1):153-160.
- [6] 王伟,李林涛,盖轶静,等.空气源热泵“误除霜”事故简析[J].制冷与空调,2015,15(3):64-71.
- [7] Dong J, Deng S, Jiang Y, et al. An experimental study on defrosting heat supplies and energy consumptions during a reverse cycle defrost operation for an air source heat pump[J]. Applied Thermal Engineering, 2012,37:380-387.
- [8] 肖彪.风冷热泵商用空调除霜控制分析[J].家电科技,2009,(23):55-57.
- [9] 蒋能照.空调用热泵技术及应用[M].北京:机械工业出版社,1997.
- [10] 许东晟,陈汝东.除霜和除霜控制研究[J].流体机械,2006,(1):69-73.
- [11] 陈汝东,许东晟.风冷热泵空调器除霜控制的研究[J].流体机械,1999,(2):55-57.
- [12] 黄虎,虞维平,李志浩,等.风冷热泵冷热水机组自调整模糊除霜控制研究[J].暖通空调,2001,(3):67-69.
- [13] Wang W, Guo Q C, Lu W P, et al. A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate[J]. International Journal of Refrigeration, 2012,35(2):475-486.
- [14] 冯颖超.空气源热泵误除霜事故研究[D].北京:北京工业大学,2018.
- [15] Biguria G, Wenzel L A. Measurement and Correlation of Water Frost Thermal Conductivity and Density[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1970,9(1):129-138.
- [16] Sengupta S, Sherif S A, Wong K V. Empirical heat transfer and frost thickness correlations during frost deposition on a cylinder in cross-flow in the transient regime[J]. International journal of energy research, 1998,22(7):615-624.
- [17] Lee K, Kim W, Lee T. A one-dimensional model for frost formation on a cold flat surface[J]. International journal of heat and mass transfer, 1997,40(18):4359-4365.
- [18] Lee Y B, Ro S T. An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2001,24(6):468-474.
- [19] Yang D, Lee K. Dimensionless correlations of frost properties on a cold plate[J]. International Journal of Refrigeration, 2004,27(1):89-96.
- [20] Yun R, Kim Y, Min M. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate[J]. International journal of refrigeration, 2002,25(3):362-371.
- [21] Barzanoni Y, Noorshams O, Tabrizi H B, et al. Experimental investigation of frost formation on a horizontal cold cylinder under cross flow[J]. International Journal of Refrigeration, 2011,34(4):1174-1180.
- [22] Kandula M. Frost growth and densification on a flat surface in laminar flow with variable humidity[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012,39(8):1030-1034.
- [23] 范嘉文.扫描探针显微镜的先进控制技术研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [24] 王小东.扫描探针显微镜图像处理关键技术研究[D].厦门:厦门大学,2017.
- [25] 张海英,梁栋.结霜与微尺度表面特性的实验研究[J].广州大学学报(自然科学版),2004,3(6):564-567.
- [26] Fossa M, Tanda G. Study of free convection frost formation on a vertical plate[J]. Experimental thermal and fluid science, 2002,26(6):661-668.
- [27] Matsumoto K, Koshizuka M, Honda M, et al. Measurement on nano scale by scanning probe microscope for obtaining real ice adhesion force[J]. International Journal of Refrigeration, 2014,41:181-189.
- [28] Matsumoto K, Akaishi M, Teraoka Y, et al. Investigation of method for measuring adhesion force of ice in nano/micro scale by using SPM[J]. International Journal of Refrigeration, 2012,35(1):130-141.
- [29] 董金铝,王玮,董振强.蒸发器结霜速率实时测定[J].激光技术,2000,(3):179-181.
- [30] Qu K, Komori S, Jiang Y. Local variation of frost layer thickness and morphology[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2006,45(2):116-123.
- [31] R W Besant, K S Reakallah, Y Mao, et al. Measurements of frost thickness using a laser beam and light meter[J]. ASHRAE Trans, 1990,96(1):519-522.
- [32] Ryosuke M, Tomoya Y, Hisashi U, et al. Investigation of water behavior in defrosting process by using neutron radiography[J]. Trans of the JSRAE, 2015.

- [33] Wang W, Xiao J, Feng Y, et al. Characteristics of an air source heat pump with novel photoelectric sensors during periodic frost-defrost cycles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013,50(1):177-186.
- [34] 肖婧.新型光电测霜技术在空气源热泵除霜控制中的应用研究[D].北京:北京工业大学,2010.
- [35] Bai X, Wang W, Sun Y, et al. Operating performances of an ASHP unit operated in a mild and humid region using tube-encircled photoelectric sensor based defrosting initiation strategy[J]. *Energy and Buildings*, 2018,177:140-153.
- [36] Ge Y, Sun Y, Wang W, et al. Field test study of a novel defrosting control method for air-source heat pumps by applying tube encircled photoelectric sensors[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016,66:133-144.
- [37] Shen Y, Wang X. Real-time frost porosity detection using capacitance sensing approach[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019,134:1171-1179.
- [38] Aguiar M L, Gaspar P D, Silva P D, et al. Medium materials for improving frost detection on a resistive sensor[J]. *Energy Reports*, 2020,6:263-269.
- [39] 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.
- [40] 殷大桢.基于分形理论的图像识别空气源热泵除霜控制方法研究[D].天津:天津大学,2018.
- [41] Li Z, Wang W, Sun Y, et al. Applying image recognition to frost built-up detection in air source heat pumps[J]. *Energy*, 2021,233:121004.
- [42] 韩勇.基于图像处理技术的空气源热泵除霜控制方法的研究[D].天津:天津大学,2017.
- [43] 王世权,王伟,孙育英,等.基于光照自适应的空气源热泵图像识别测霜技术研究[J].*暖通空调*,2022,52(7):113-117.
- [44] Malik A N, Khan S A, Lazoglu I. A novel hybrid frost detection and defrosting system for domestic refrigerators[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2020,117:256-268.
- [45] Andrade-Ambriz Y A, Ledesma S, Belman-Flores J M, et al. Frost thickness estimation in a domestic refrigerator using acoustic signals and artificial intelligence[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 201:117071.
- [46] Aguiar M, Gaspar P D, Da Silva P D. Image recognition method for frost sensing applications[J]. *Energy Reports*, 2022,8:234-240.
- [47] Chen S, Chen K, Zhu X, et al. Deep learning-based image recognition method for on-demand defrosting control to save energy in commercial energy systems[J]. *Applied Energy*, 2022,324:119702.

(上接第 111 页)

- [12] Song J, Li X. The Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in HVAC Education[M]. *Life System Modeling and Intelligent Computing*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010:238-244.
- [13] 张旭,吴经纬,朱益平等.R410A 在钎焊板式换热器中蒸发换热和压降性能的试验研究[C].中国热泵产业联盟年会暨第五届亚洲空气源热泵论坛,2016:111-117.
- [14] Kannadhasan V, Senthil Kumar A, Vairamuthu J, et al. Experimental research and CFD analysis on double pipe heat exchanger with CuO nano particle suspended in cold water[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2022,147(5):3831-3838.