

文章编号:0253-4339(2026)05-0081-11
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250723001

不同阵列规模下空气源热泵“冷湿岛效应”变化规律及影响 实测研究

梁士民^{1,2} 王 哲^{1,2} 高学锋^{1,2} 闫月茹^{1,2} 王 刚^{1,2} 胡松涛^{1,2} 徐 策³

(1 青岛理工大学环境与市政工程学院 青岛 266520; 2 健康环境与低碳能源山东省工程研究中心 青岛 266520;
3 中国建筑科学研究院有限公司 北京 100013)

摘 要 随着空气源热泵在中大型供暖项目中的广泛应用,阵列规模不断扩大,阵列中心“冷湿岛效应”加剧,严重制约机组运行能效和供暖系统稳定性。为研究不同阵列规模的空气源热泵“冷湿岛效应”变化规律及影响,本文依托山东省威海市 2 个不同阵列规模空气源热泵阵列供暖项目,搭建现场测试平台,选取典型日工况与长期工况进行测试。结果表明:随着阵列规模从 44 台增至 64 台,阵列中心机组平均“冷岛效应”强度和“湿岛效应”强度分别增加 1.5~2.7 °C 和 0.3~0.9 °C,平均除霜次数增加 10~20 次,平均制热能力衰减 12.2%~19.4%,平均 COP 降低 15.7%~16.6%,结除霜过程制热量损失系数 ε_L 分别升高 0.05~0.07,阵列中心“冷湿岛效应”加剧,除霜频率升高,制热性能大幅衰减。阵列外侧机组“冷岛效应”强度与“湿岛效应”强度无明显差异, ε_L 、平均制热量与平均 COP 基本保持不变,制热性能变化相对较小。本文揭示并量化了不同阵列规模的空气源热泵“冷湿岛效应”变化规律及影响,为空气源热泵规模化应用和高效运行提供数据支撑。

关键词 空气源热泵;冷湿岛效应;阵列规模;现场测试;制热性能

中图分类号: TB61¹;TU832.1

文献标识码: A

Field Study on the Variation and Impact of the "Cold and Wet Island Effect" of Air-Source Heat Pumps under Different Array Scales

Liang Shimin^{1,2} Wang Zhe^{1,2} Gao Xuefeng^{1,2} Yan Yueru^{1,2} Wang Gang^{1,2} Hu Songtao^{1,2} Xu Ce³

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China; 2. Qingdao University of Technology, Shandong Engineering Research Center of Healthy Environment and Low-Carbon Energy, Qingdao 266520, China; 3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract With the expansion of air-source heat pump (ASHP) heating systems, ASHP arrays have become the main arrangement for medium-to large-scale heating projects, and their scales continue to expand with the increased demand for heating. However, larger array scales intensify the "cold and wet island (CWI) effect" at the array center, significantly reducing the unit efficiency and threatening the system stability. To investigate the variations of the CWI effect with array scale in ASHP systems, a field-testing platform is established based on two ASHP heating projects with different scales in Weihai, China. Tests under both typical daily and long-term conditions show that increasing the array scale from 44 to 64 units raises the average cold island and wet island intensities at the array center by 1.5~2.7 °C and 0.3~0.9 °C, respectively. The defrost frequency is increased by 10~20 times, with average heating capacity declined by 12.2%~19.4%, COP decreased by 15.7%~16.6%, and heating loss coefficients increased by 0.05~0.07. These results indicate a significant intensification of the CWI effect at the center, leading to more frequent defrosting and reduced heating performance. In contrast, peripheral units show the negligible changes in CWI intensities, heating capacity, COP, and defrosting losses. This study quantifies the CWI effect at different array scales, providing data support for the large-scale application and efficient operation of ASHP systems.

Keywords air-source heat pump; cold and wet island effect; array scale; field test; heating performance

住宅集中供热作为建筑能源系统的关键组成部分,其能源结构向低碳转型是实现国家“双碳”目标的核心路径^[1]。因此,利用可再生能源技术替代传统

能源,满足建筑低碳用能需求已成为该领域的必然选择^[2]。随着“清洁取暖”政策的持续推进,空气源热泵(air-source heat pump, ASHP)作为一种成熟且高效

的可再生能源技术,在建筑清洁供暖领域中展现出显著优势^[3-4]。ASHP 供暖场景规模也从户级扩展至百万平方米级别,空气源热泵阵列(ASHP-A)成为主要布置形式^[5]。然而,当 ASHP-A 规模较大时,受冷风回流的影响,ASHP-A 中心区域极易形成“低温高湿”的局部微气候,形成“冷湿岛效应”,降低机组进风能量品质,增加机组结霜风险及结除霜损失,恶化机组制热性能,严重制约 ASHP-A 的高效运行^[6]。

现有研究聚焦于 ASHP-A 运行中产生的“冷岛效应”,探究“冷岛效应”的影响因素和缓解措施。在“冷岛效应”的影响因素方面,国内外学者深入研究了多种影响因素,包括阵列规模^[7]、阵列安装间距^[8-10]、环境温度、环境风场和周围遮挡物^[10-11]以及 ASHP 机组的容量^[11],并通过现场测试揭示其变化特征以及对中心机组制热性能的显著影响^[12]。

在缓解措施方面,国内外学者通过数值模拟和实验验证的方法,提出了一系列改善措施,如优化机组的布置方式^[13]、机组间增设隔流板^[13]、增加机组间的间距^[14-15]、添加拔风罩^[14-15]以及提高机组的安装高度^[14-16]等。结果表明,“冷岛效应”会显著影响机组的运行性能,而通过实施上述措施,可以有效削弱“冷岛效应”,提升 ASHP-A 的整体性能。

目前仅有少量研究关注 ASHP“冷湿岛效应”,王涵^[6]首次提出 ASHP-A“湿岛效应”的概念,并建立了相应的性能损失评估模型,初步探究了影响因素。高学锋^[17]通过现场测试进一步证明了 ASHP-A 中显著存在“冷湿岛效应”,从相对环境侧空气饱和度的偏移程度优化了“湿岛效应”强度定义,首次揭示了 ASHP“冷湿岛效应”交互关系及其影响并解耦分析了 ASHP“冷湿岛效应”关键影响因素及其影响规律。梁士民等^[18]通过现场实测揭示了 ASHP-A“冷湿岛效应”与结除霜现象相互影响。结果表明,在“冷湿岛效应”的影响下,阵列中心的机组相较于外侧机组除霜频率增加 225%,频繁除霜导致阵列中心机组的冷岛强度降低了 4.3%,湿岛强度升高了 3.9%,除霜对“冷湿岛效应”影响并不显著。

现有研究证实 ASHP 阵列中存在“冷湿岛效应”,并从概念定义、影响因素和交互关系等方面对 ASHP-A“冷湿岛效应”进行了初步探究,但大多研究局限于单一阵列规模,缺乏对不同阵列规模下 ASHP“冷湿岛效应”变化规律及影响的实测支撑。

本文依托山东省威海市某 ASHP 阵列供暖示范工程,选择 2 个不同规模的 ASHP 阵列,围绕阵列中心和外侧机组,采用现场测试的方法,深入研究不同阵列规模下 ASHP“冷湿岛效应”变化规律及影响,为

ASHP 规模化应用和高效运行提供数据支撑。

1 测试项目及系统

本文选取山东省威海市 2 个不同规模的 ASHP 阵列供暖示范工程,并搭建了完善的全自动监控测试系统,通过云平台获取各参数的实时测试数据。

1.1 测试项目

示范工程位于寒冷气候区的威海市,冬季空调设计室外空气温度为 $-7.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 61%,设计供暖天数为 137 d。

测试项目为 2 个基于 ASHP 构建的阵列供热系统,分别由 64 台和 44 台机组构成,具体布置方式如图 1 所示。其中,图 1(a)为测试项目 1 平面图,采用 5 列 ASHP 机组布置,第 1 列设置 12 台,第 2~5 列每列配置 13 台,设备排列紧密,列间距为 1.74 m,总占地面积约 311 m^2 ;图 1(b)为测试项目 2 的平面图,共 4 列 ASHP 机组,每列安装 11 台 ASHP,列间间距保持一致,占地面积约为 202.8 m^2 。所采用机组均为定频型,该机组在名义工况下(干球温度 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ /湿球温度 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,出水温度 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$)的制热量为 78.0 kW,名义 COP(性能系数,coefficient of performance)为 3.35,配置 2 台 50 Hz 涡旋压缩机,制冷剂采用 R410A。室外侧换热系统由 2 台平翅片换热器组成,总传热面积为 134.8 m^2 ;送风系统配备 2 台轴流风机,额定风量为 12 500 m^3/h 。

1.2 测试系统

为全面揭示不同阵列规模的 ASHP“冷湿岛效应”影响规律,分别选取 2 个项目的阵列中心和外侧机组(图 1)进行长期测试。在距机组上风位 15 m 处设立一座小型气象监测站,用于采集环境温湿度、风速与风向等基础气象参数。监测系统实现了对机组多参数的全自动、周期性数据采集(每 60 s 一次),涵盖空气侧、制冷剂侧、水侧及机组功率等关键运行参数。具体包括:进/排风口温湿度、供/回水温度、供水流量、盘管温度及机组功率。测点具体布置图与各传感器的详细信息如文献[18]中图 2 与表 2 所示。

由于测试系统中各传感器的直接测量误差会传递至间接测量值,从而引入间接测量误差,对此有必要对间接测量结果进行误差分析^[19]。本文采用相对不确定度 U_r 作为评价指标,表达式如下:

$$N = f(X, Y, Z, \dots) \quad (1)$$

$$\delta_N = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X} \delta_X\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y} \delta_Y\right)^2 + \dots} \quad (2)$$

$$U_r = \delta_N / \bar{N} \quad (3)$$



图1 测试项目平面示意图

Fig.1 Schematic plan of the test project

式中: N 为间接测量参数; X 、 Y 和 Z 为计算 N 的相关参数; δ_N 为标准不确定度。

2 测试方案及评价

本研究于2025年1月12日—24日对ASHP阵列中心机组与阵列外侧机组进行13 d的典型结霜工况下机组性能测试。

2.1 测试工况

图2所示为长期测试工况下环境温湿度在结霜图谱上的分布,根据分区域结霜图谱^[20]分析可知,测试期间项目1和项目2的运行工况均以结霜工况为主,占比分别为83.4%和89.9%,结霜风险较高。根据气象站数据显示,项目1现场的环境温度为 $-9.8\sim 11.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均室外温度为 $-0.67\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度为28.1%~86.6%,平均相对湿度为68.2%。项目2现场的环境温度为 $-8.9\sim 11.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均室外温度为 $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$;相对湿度为26.3%~83.0%,平均相对湿度为65.6%。

图3所示为长期测试工况下自然环境风风向风速,项目1与项目2测试期间室外环境风向均以北风为主导风向,北风风向占比100.0%,环境风速变化区间分别为 $0\sim 14.1\text{ m/s}$ 与 $0\sim 14.4\text{ m/s}$,平均风速分别为 2.8 m/s 和 3.1 m/s ,无风工况占比分别为10.7%和12.1%。此外,测试期间2台测试机组供水均设定温度为 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$,除霜控制均采用常规的时间-温度(time-

temperature, T-T)逻辑^[21],且开机率均维持在95%以上。

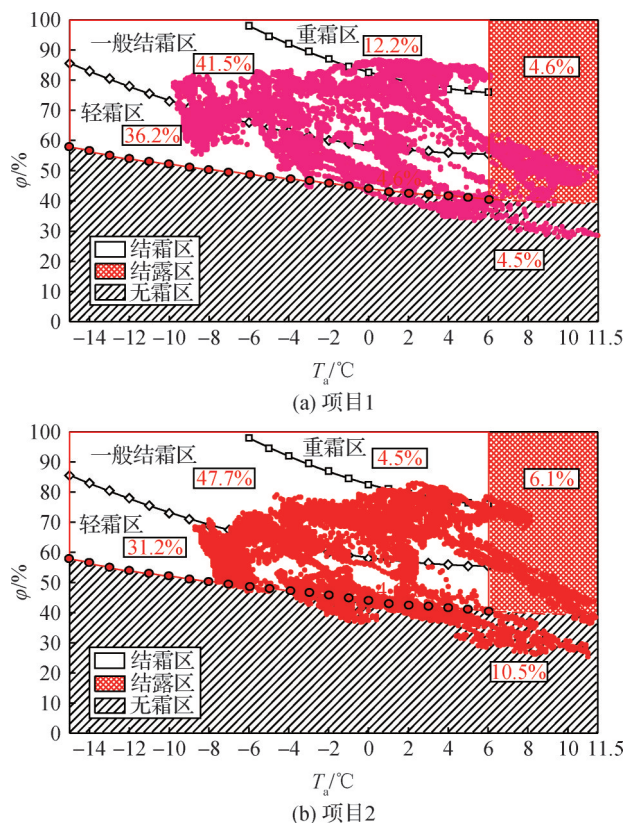


图2 长期测试工况下环境温湿度在结霜图谱上的分布^[20]
Fig.2 Distribution of ambient temperature and humidity on the frosting map under long-term test conditions^[20]

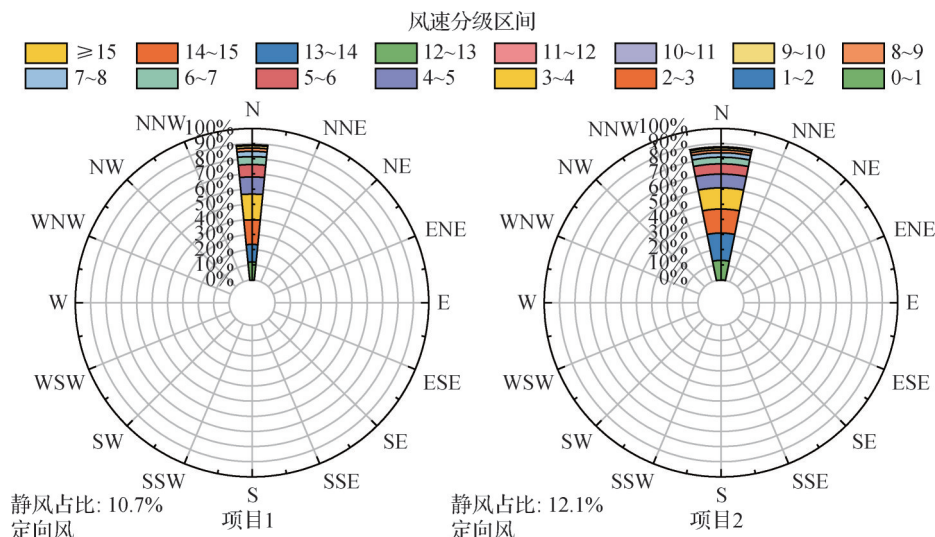


图 3 长期测试工况下自然环境风风向风速

Fig.3 Natural ambient wind direction and speed under long-term test conditions

综上,2个项目测试期间环境侧参数、机组侧参数差距较小,可认为上述参数对本次测试无影响。

2.2 评价指标

为了有效评价“冷湿岛效应”,选取“冷岛效应”强度 $\Delta T^{[6]}$ 和“湿岛效应”强度 $\Delta T_{wb}^{[22]}$ 作为主要评价指标。其中,“冷岛效应”强度 ΔT 计算如下:

$$\Delta T = T_a - T_{in} \quad (4)$$

式中: T_a 为 ASHP 阵列上风位环境空气温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 为 ASHP 机组进风温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

“湿岛效应”强度 ΔT_{wb} 计算如下:

$$\Delta T_{wb} = \Delta T_{sa} - \Delta T_{sin} = (T_a - T_{wba}) - (T_{in} - T_{wbin}) \quad (5)$$

式中: ΔT_{sa} 为 ASHP-A 气象站环境空气干球温度与湿球温度之差, $^{\circ}\text{C}$; ΔT_{sin} 为 ASHP 机组进风空气干球温度与湿球温度之差, $^{\circ}\text{C}$; T_{wba} 为环境空气湿球温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{wbin} 为 ASHP 机组进风空气湿球温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

式(5)中的湿球温度计算^[23]如下:

$$T_{wb} = T_{atan} [0.151\,977(\varphi + 8.313\,659)^{1/2}] + \text{atan}(T + \varphi) - \text{atan}(\varphi - 1.676\,331) + 0.003\,918\,38\varphi^{3/2}\text{atan}(0.023\,101\varphi) - 4.686\,035 \quad (6)$$

式中: T 为空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; φ 为空气相对湿度,%。

此外,为了分析“冷湿岛效应”对 ASHP 阵列性能的影响,本文选取瞬时制热能力 q ,ASHP 机组消耗单位电能产生的供热量 COP 作为机组制热性能的评价指标,其表达式如下:

$$q = c_w m_w \Delta T_w \quad (7)$$

$$\text{COP} = q/W \quad (8)$$

式中: q 为机组的瞬时制热能力, kW ; c_w 为机组循环水的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; m_w 为机组循环水的流量, m^3/h ; ΔT_w 为机组的供回水温差, $^{\circ}\text{C}$; W 为 ASHP 机组的输入

功率, kW 。

为评价 ASHP 机组在结除霜过程中的运行性能,通常采用结除霜过程制热量损失系数 $\varepsilon_L^{[24]}$ 作为评价指标,表达式如下:

$$\varepsilon_L = \frac{\int_0^{t_n} q_{hc} - q dt}{\int_0^{t_n} q_{hc} dt} \quad (9)$$

式中: t_n 为 ASHP 机组除霜恢复结束时刻至下一次除霜恢复结束时刻的时间, s ; q_{hc} 为机组无霜工况下的瞬时制热量, kW 。

3 测试结果与分析

为研究不同阵列规模下 ASHP-A “冷湿岛效应”的影响规律,选取典型日测试工况与长期测试工况,对 2 个项目 ASHP 机组测试结果进行详细分析。

3.1 典型日测试工况下不同阵列规模 ASHP “冷湿岛效应”变化规律及影响分析

典型日结霜测试工况下环境温湿度变化规律如图 4 所示。可以看到,项目 1 环境温度和環境相对湿度变化区间分别为 $-2.9 \sim 7.1\,^{\circ}\text{C}$ 和 $39.2\% \sim 73.0\%$,项目 1 环境温度和環境相对湿度变化区间分别为 $-3.2 \sim 6.4\,^{\circ}\text{C}$ 和 $38.2\% \sim 70.1\%$ 。其中,项目 1 和项目 2 环境平均温度分别为 $0.5\,^{\circ}\text{C}$ 和 $0.4\,^{\circ}\text{C}$,环境平均相对湿度分别为 58.4% 和 55.9% 。根据式(4)计算得出阵列中各机组的冷岛强度,其变化规律如图 5 所示。可以看到,项目 1 阵列中心机组和外侧机组“冷岛效应”强度变化区间分别为 $-4.5 \sim 9.1\,^{\circ}\text{C}$ 和 $-1.1 \sim 4.2\,^{\circ}\text{C}$,项目 2 阵列中心机组和外侧机组“冷岛效应”强度变化区间分别为 $-0.7 \sim 5.5\,^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.5 \sim 3.4\,^{\circ}\text{C}$ 。其中,项目 1

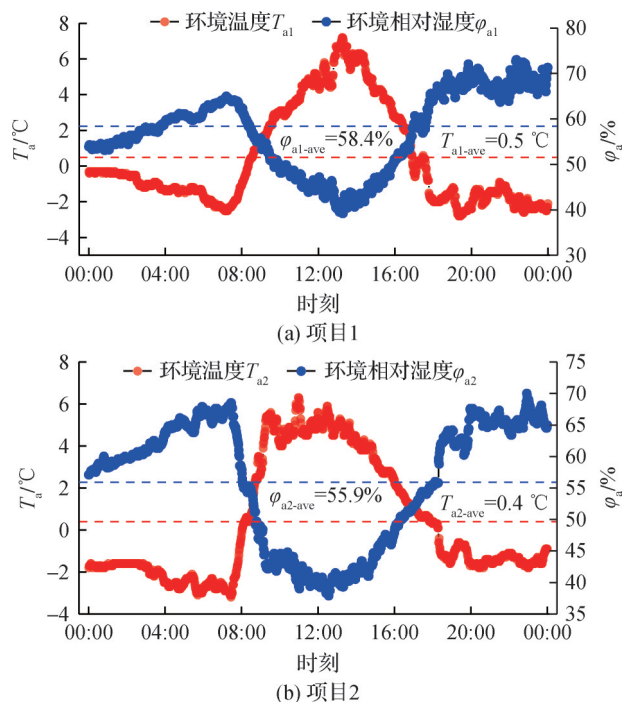


图 4 典型日结霜测试工况下环境温湿度变化规律

Fig.4 Variation of ambient temperature and humidity under typical daily frosting test conditions

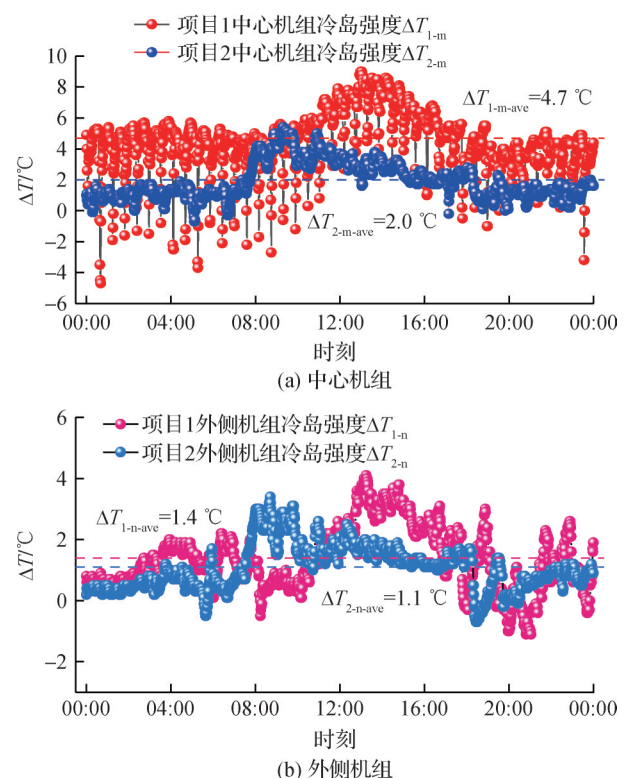


图 5 典型日结霜测试工况下冷岛强度变化规律

Fig.5 Variation of cold-island intensity under typical daily frosting test conditions

与项目 2 阵列中心机组的平均冷岛强度分别为 4.7 °C 和 2.0 °C,项目 1 相较项目 2 提高了 2.7 °C。在阵列外侧机组中,项目 1 和项目 2 的平均冷岛强度分

别为 1.4 °C 和 1.1 °C,项目 1 相比项目 2 升高 0.3 °C。

按照式(5)与式(6)计算所得的湿岛强度变化如图 6 所示。可以看到,项目 1 阵列中心机组与外侧机组“湿岛效应”强度变化区间分别为 0.3~3.7 °C 和 0~1.3 °C,项目 2 阵列中心机组与外侧机组“湿岛效应”强度变化区间分别为 0~2.2 °C 和 0~1.3 °C。项目 1 与项目 2 阵列中心机组的平均湿岛强度分别为 1.7 °C 和 0.8 °C,项目 1 相较于项目 2 提高了 0.9 °C,相对增幅为 112.5 %。而在阵列外侧机组中,2 个项目的平均湿岛强度均为 0.4 °C,并无差异。

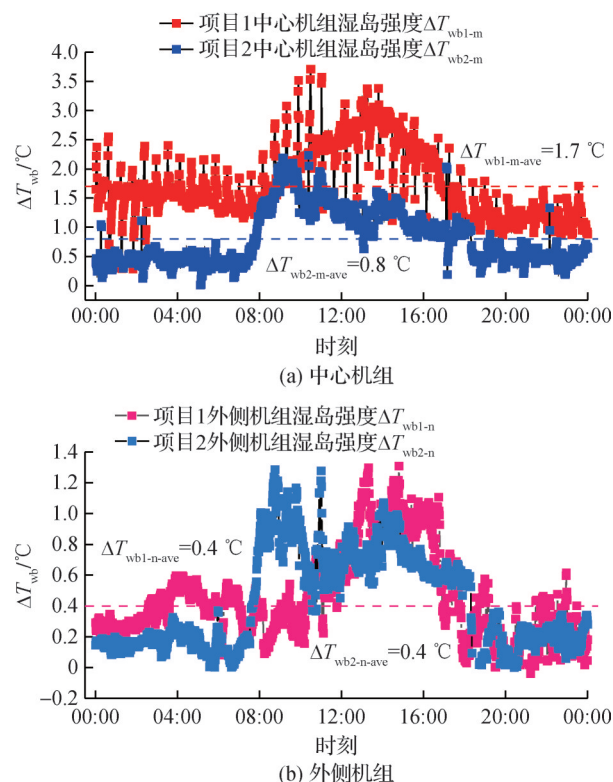


图 6 典型日结霜测试工况下湿岛强度变化规律

Fig.6 Variation of wet-island intensity under typical daily frosting test conditions

可见,在该典型日工况下,外侧机组的“冷湿岛效应”较弱,阵列规模的变化对外侧机组“冷湿岛效应”强度影响较小;阵列中心机组存在显著的“冷湿岛效应”且随着阵列规模的扩大,“冷湿岛效应”强度增加。

为评估典型日工况下不同阵列规模 ASHP 机组结霜除霜风险,通过 ASHP 分区域结霜图谱^[21]进行了分析。图 7 所示分别为项目 1 和项目 2 典型日结霜测试工况下环境温湿度、阵列中心及外侧机组进风温湿度在结霜图谱上的分布规律。可以看到,项目 1 和项目 2 所处环境结霜风险较高,结霜工况占比分别高达 94.9% 和 94.7%。

项目 1 阵列外侧机组一般结霜区和轻霜区工况占比分别为 62.4% 和 37.6%, 相较于项目 2 阵列外侧机组一般结霜区工况占比 57.4% 和轻霜区工况占比 32.6% 均增加 5.0%。项目 1 阵列中心机组一般结霜区和重霜区工况占比分别为 91.1% 和 8.4%, 项目 2 分别为 68.1% 和 0.7%, 而项目 1 阵列中心机组较项目 2 在一般结霜区和重霜区的占比分别增加 23.0% 和 7.7%。

结果表明, 随着阵列规模的扩大, 阵列中心机组面临更高的结霜风险, 而阵列外侧机组结霜风险差异较小。

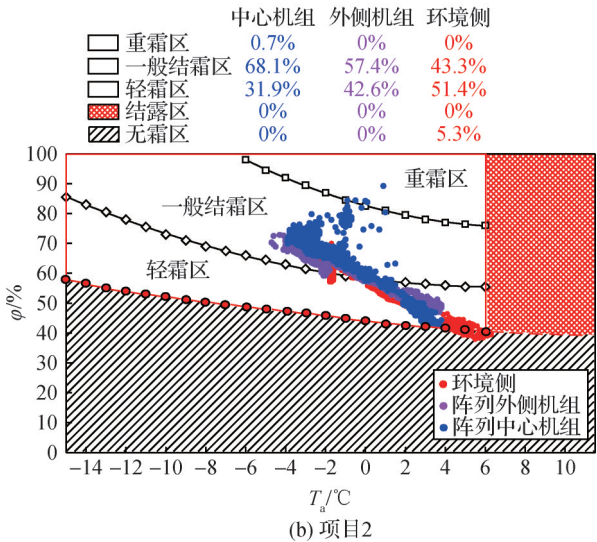
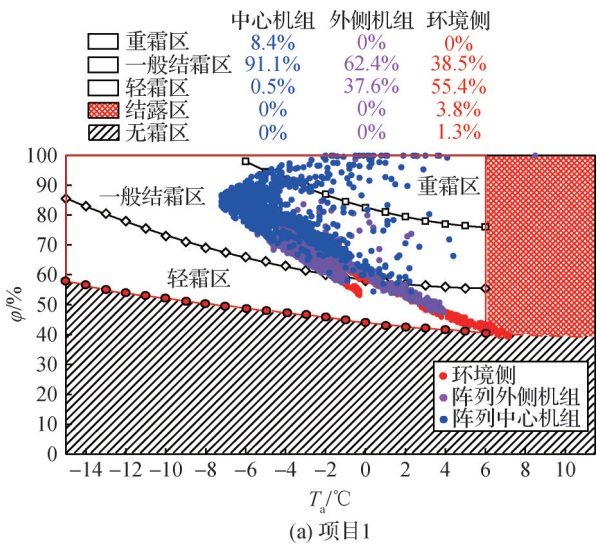


图 7 典型日工况下环境温湿度、测试机组进风温湿度在结霜图谱上的分布^[20]

Fig.7 Distribution of ambient temperature and humidity, test units inlet air temperature and humidity on the frosting map under typical daily conditions^[20]

图 8 所示为典型日工况下项目 1 和项目 2 阵列中心和外侧机组的除霜频率统计。可以看到, 项目 1 阵

列中心机组累计除霜 41 次, 较项目 2 阵列中心机组除霜 13 次增加了 28 次。项目 1 阵列外侧机组累计除霜 6 次, 较项目 2 阵列外侧机组除霜 3 次仅增加 3 次。

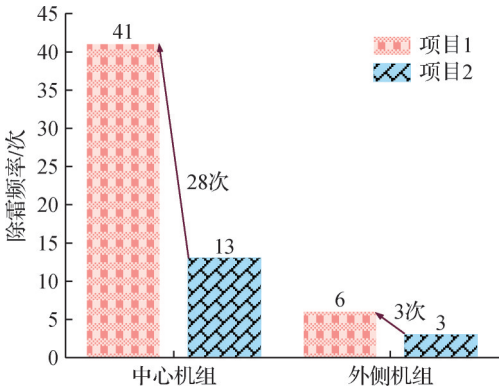


图 8 典型日工况下测试机组的除霜频率

Fig.8 Defrost frequency of the test units under typical daily conditions

可见, 随着阵列规模的扩大, ASHP-A “冷湿岛效应”影响加剧, 阵列中心机组结霜风险增加, 加剧了阵列中心机组的结霜与除霜频率, 但阵列外侧机组除霜频率差距较小。

由上述分析可知, 阵列规模扩大后, ASHP “冷湿岛效应”增强, 阵列中心机组除霜频率增加, 进而对 ASHP 机组运行性能产生严重影响。进一步地, 通过分析测试机组的结除霜过程制热量损失系数 ε_L 、制热量和 COP, 全面评估不同阵列规模下 ASHP “冷湿岛效应”作用下的机组性能表现。

典型日测试工况下测试机组平均结除霜过程制热量损失系数如图 9 所示。项目 1 与项目 2 阵列中心机组 ε_L 平均值分别为 0.21 和 0.14, 外侧机组 ε_L 平均值分别为 0.08 和 0.06。其中, 项目 1 中心机组与外侧机组 ε_L 平均值分别较项目 2 中心机组与外侧机组增加 0.07 和 0.02。

上述结果表明, 随着阵列规模扩大, “冷湿岛效应”加剧, 阵列中心机组结除霜损失增加, 机组性能恶化更为严重, 对外侧机组影响较小。

图 10 所示为典型日测试工况下项目 1 与项目 2 阵列中心与外侧机组瞬时制热量变化规律。可以看到, 阵列中心机组由于频繁除霜, 制热量出现了频繁的快速下降规律。项目 1 与项目 2 阵列中心机组平均瞬时制热量分别为 40.7 kW 和 50.5 kW, 项目 1 与项目 2 阵列外侧机组平均瞬时制热量分别为 57.7 kW 和 59.2 kW。随着 ASHP-A 规模扩大, “冷湿岛效应”加剧, 项目 1 中心机组与外侧机组平均瞬时制热量较

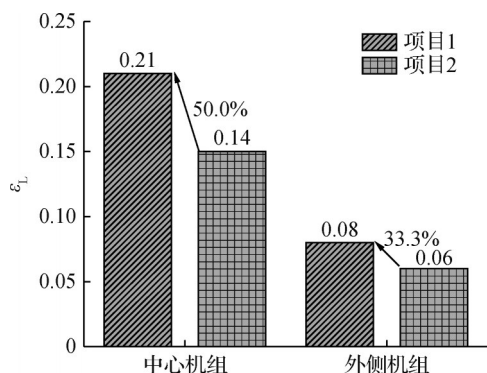
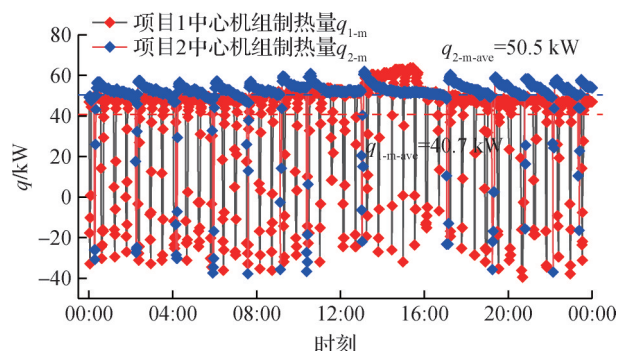
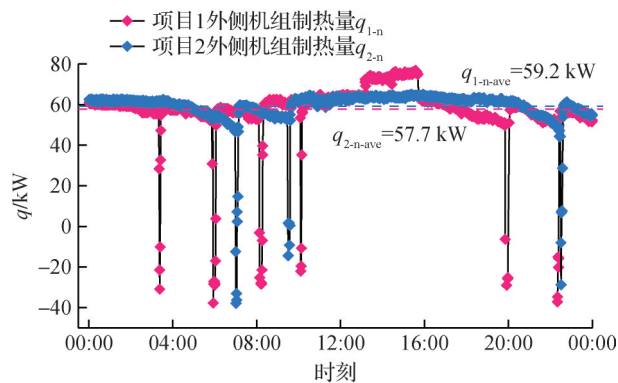


图 9 典型日工况下测试机组平均结霜过程制热量损失系数

Fig.9 Average heating capacity loss coefficient during the frosting-defrosting process of the test units under typical daily conditions



(a) 中心机组



(b) 外侧机组

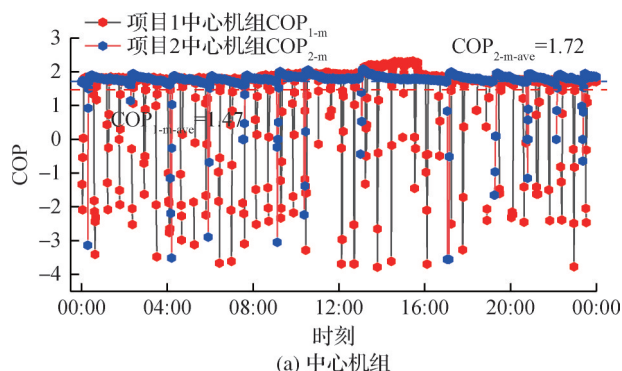
图 10 典型日工况下测试机组瞬时制热量 q 变化规律

Fig.10 Variation of instantaneous heating capacity q for test units under typical daily conditions

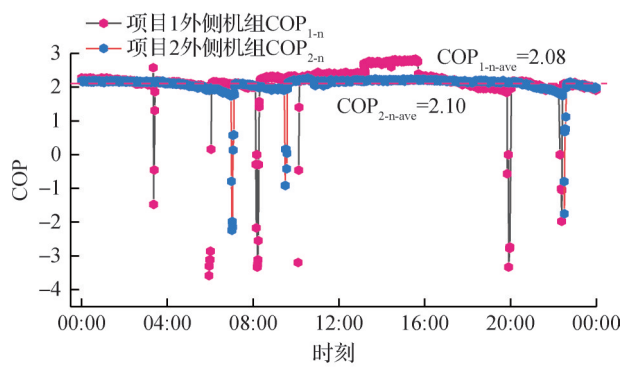
项目 2 中心机组与外侧机组平均瞬时制热量分别下降 19.4% 和 2.5%。

图 11 所示为典型日测试工况下项目 1 与项目 2 阵列中心与外侧机组瞬时 COP 变化规律。其中,项目 1 与项目 2 阵列中心机组平均瞬时 COP 分别为 1.47 和 1.72,项目 1 与项目 2 阵列外侧机组平均瞬时 COP 分别为 2.08 和 2.10。项目 1 中心机组平均瞬时 COP 较项目 2 中心机组下降 15.7%,外侧机组平均瞬时 COP 无差异。

上述结果表明,随着阵列规模的扩大,阵列中心机组的制热量和 COP 显著下降,而外侧机组的制热量与 COP 受影响较小。



(a) 中心机组



(b) 外侧机组

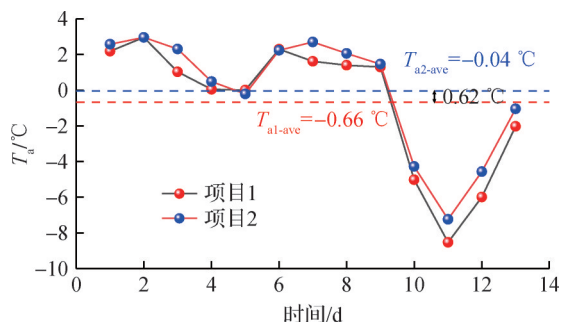
图 11 典型日工况下测试机组瞬时 COP 变化规律

Fig.11 Variation of instantaneous COP for test units under typical daily conditions

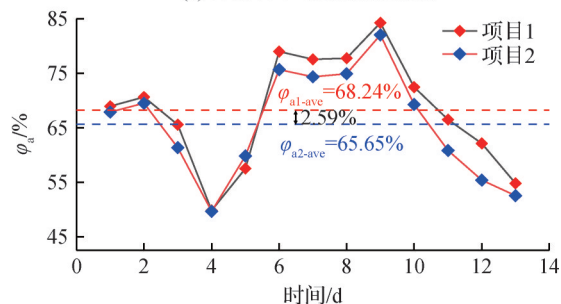
3.2 长期测试工况下不同阵列规模 ASHP“冷湿岛效应”变化规律及影响分析

测试期间环境日平均温度与日平均相对湿度变化规律如图 12 所示。项目 1 与项目 2 环境平均温度分别为 $-0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高日平均温度均为 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低日平均温度分别为 $-8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-7.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。项目 1 与项目 2 环境平均相对湿度分别为 68.24% 和 65.65%,最高日平均相对湿度为 84.3% 和 82.1%,最低日平均相对湿度均为 49.7%。

如图 13 所示,长期测试工况下项目 1 与项目 2 的日平均冷岛强度与日平均湿岛强度表现出显著差异。可以看到,项目 1 与项目 2 阵列中心机组的“冷岛效应”与“湿岛效应”强度均明显高于外侧机组,且项目 1 无论是中心机组还是外侧机组,其冷岛强度和湿岛强度均高于项目 2,中心区域差异更为显著。以平均值对比,项目 1 中心机组冷岛强度和湿岛强度分别较项目 2 升高 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,外侧机组分别升高 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。表明阵列规模较大的项目 1 冷湿岛效应更加明显。



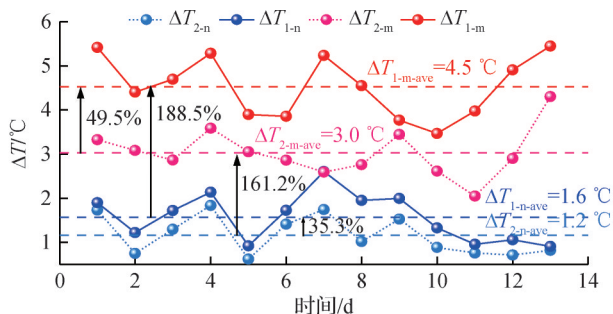
(a) 环境日平均温度变化规律



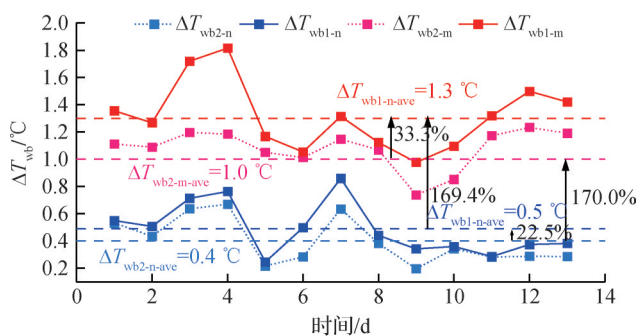
(b) 环境日平均相对湿度变化规律

图12 长期测试工况下环境日平均温湿度变化规律

Fig.12 Variation of daily average ambient temperature and humidity under long-term test conditions



(a) 测试机组日平均冷岛强度变化规律



(b) 测试机组日平均湿岛强度变化规律

图13 长期测试工况下测试机组日平均冷岛强度与日平均湿岛强度变化规律

Fig.13 Variation of daily average cold-island intensity and mean wet island intensity for test units under long-term test conditions

长期测试结果进一步表明,随着阵列规模扩大,阵列中心机组“冷湿岛效应”强度增加,“冷湿岛效应”更加显著。外侧机组的“冷湿岛效应”相对较弱,

阵列规模的变化对外侧机组“冷湿岛效应”强度影响较小。

图14所示为长期测试工况下,项目1与项目2阵列中心与外侧机组的日平均除霜频率变化规律。项目1阵列中心机组在测试期间的日平均除霜次数为39次,较项目2阵列中心机组的29次增加10次;项目1外侧机组日平均除霜15次,相比项目2外侧机组日平均除霜次数13次仅升高了2次。

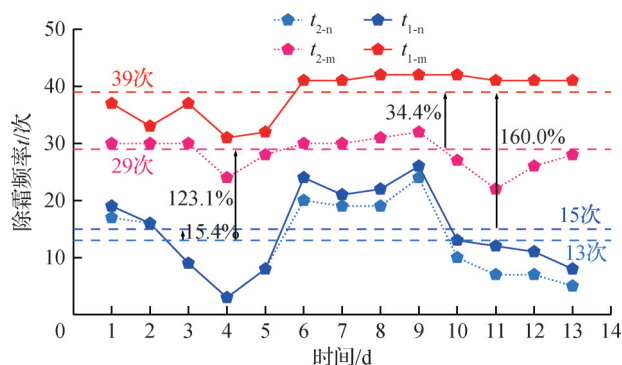


图14 长期测试工况下测试机组日平均除霜频率变化规律

Fig.14 Variation of daily average defrost frequency for test units under long-term test conditions

结果进一步表明,随着阵列规模的扩大,“冷湿岛效应”影响加剧,阵列中心机组结霜风险增加,加剧了机组结霜除霜频率,而外侧机组受“冷湿岛效应”影响较小,结霜除霜频率无显著差异。

通过分析长期测试下机组的结除霜过程制热量损失系数 ε_L 、制热量和COP变化规律,进而评估不同阵列规模下ASHP“冷湿岛效应”长期作用下的机组性能表现,进一步验证不同阵列规模下ASHP“冷湿岛效应”影响规律。

图15所示为长期测试工况下项目1与项目2阵列中心与外侧机组的平均结除霜过程制热量损失系数变化规律。长期测试工况下,项目1与项目2阵列中心机组 ε_L 平均值分别为0.26和0.21,外侧机组 ε_L 平均值分别为0.14和0.13。项目1中心机组 ε_L 平均值较项目2增加0.05,外侧机组 ε_L 平均值较项目2升高0.01。

长期测试结果进一步表明,随着阵列规模扩大,“冷湿岛效应”影响加剧,阵列中心机组结除霜损失增加,中心机组性能恶化更为严重,而外侧机组 ε_L 影响相对较小。

图16所示为长期测试工况下机组日平均制热量与日平均COP的变化规律。项目1与项目2阵列中心机组平均制热量分别为39.6 kW和42.1 kW,项目1与项目2阵列外侧机组平均制热量分别为60.3 kW

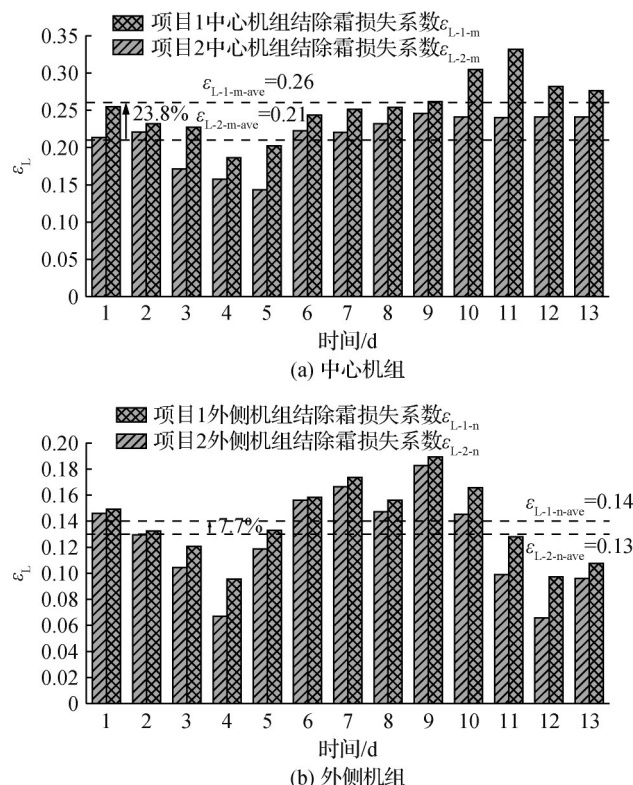


图 15 长期测试工况下机组的日平均结除霜过程制热量损失系数变化规律

Fig.15 Variation of daily average heat loss coefficient ε_L during frosting-defrosting process for units under long-term test conditions

和 61.3 kW。项目 1 中心机组平均制热量较项目 2 中心机组平均制热量下降 12.2%，外侧机组平均制热量较项目 2 外侧机组平均制热量下降 1.6%。项目 1 与项目 2 阵列中心机组平均 COP 分别为 1.21 和 1.45，项目 1 与项目 2 阵列外侧机组平均 COP 分别为 2.15 和 2.00。项目 1 中心机组平均 COP 较项目 2 中心机组平均 COP 下降 16.6%，外侧机组平均 COP 较项目 2 外侧机组平均 COP 下降 7.0%。

长期测试结果表明，随着 ASHP-A 阵列规模的扩大，“冷湿岛效应”加剧且影响范围扩大，长期作用下阵列中心机组的制热性能和 COP 显著下降，而外侧机组受“冷湿岛效应”影响较弱，制热量与 COP 影响相对较小。

此外，按照式(1)~式(3)可计算出冷岛强度、湿岛强度、 ε_L 、制热量、COP 的相对不确定度分别为 6.7%、7.1%、6.4%、7.4%、7.7%，均在合理范围内，说明测试结果具有较好的可信度。

4 结论

本文依托山东省威海市 ASHP 供暖示范工程典型日和长期测试工况数据，分析了 ASHP 阵列规模从

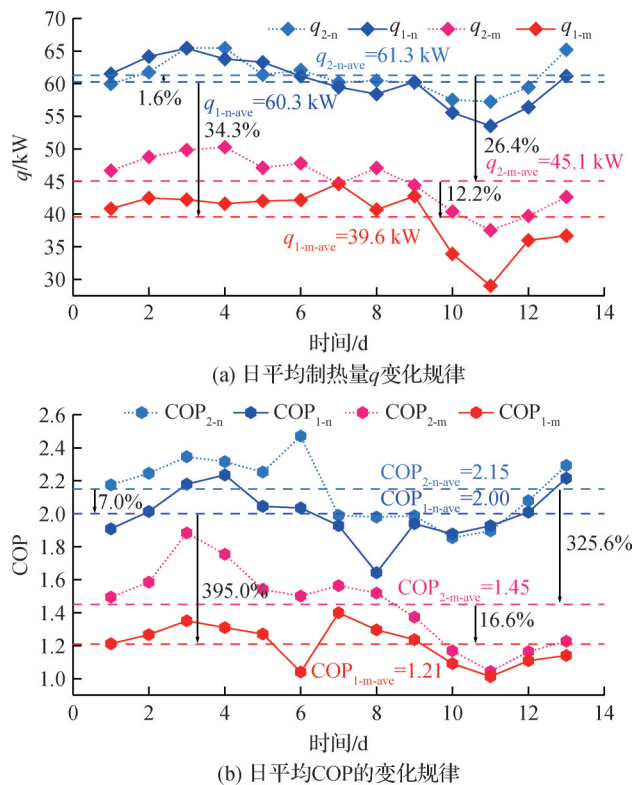


图 16 长期测试工况下机组日平均制热量 q 与日平均 COP 的变化规律

Fig.16 Variation of daily average heating capacity q and daily average COP for units under long-term test conditions

44 台增至 64 台的情况下空气源热泵“冷湿岛效应”影响以及对机组制热性能的影响，得到如下结论：

1) 随着阵列规模从 44 台增至 64 台，阵列中心机组平均“冷岛效应”强度和“湿岛效应”强度分别增加 1.5~2.7 °C 和 0.3~0.9 °C；外侧机组平均“冷岛效应”强度和“湿岛效应”强度分别增加 0.3~0.4 °C 和 0~0.1 °C。阵列中心“冷湿岛效应”加剧，阵列外侧机组“冷湿岛效应”变化较小。

2) 随着阵列规模从 44 台增至 64 台，阵列中心机组平均除霜次数增加了 10~20 次，外侧机组仅增加 2~3 次。阵列中心机组除霜频率升高，结霜风险增加，阵列规模增加对外侧机组除霜频率影响相对较小。

3) 随着阵列规模从 44 台增至 64 台，阵列中心机组平均制热能力衰减 12.2%~19.4%，平均 COP 降低 15.7%~16.6%，结除霜过程制热量损失系数增加 0.05~0.07，阵列中心机组制热性能大幅衰减。阵列外侧机组平均制热能力衰减了 1.6%~2.5%，平均 COP 降低 0%~7.0%，结除霜过程制热量损失系数仅升高 0.01~0.02，阵列规模增加对外侧机组制热性能影响相对较小。

本文受山东省自然科学基金(ZR2022ME148)和青岛市科

技惠民示范专项项目(25-1-5-cspz-1-nsh)资助。(The project was supported by Shandong Municipal Natural Science Foundation (No. ZR2022ME148) and Qingdao Science and Technology Benefiting the People Demonstration Special Project (No. 25-1-5-cspz-1-nsh).)

参考文献

- [1] You Kairui, Li Yan, Feng Wei, et al. A provincial analysis of centralized heating systems decarbonization in China's residential sector: history and future[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 104: 105306.
- [2] Wang Wei, Di Haoran, Tang Rui, et al. Effect of supply water temperature on frosting performance of air source heat pump and indoor thermal environment in space heating [J]. *Building and Environment*, 2025, 267: 112258.
- [3] 蒲思倩. 论“双碳”目标下可再生能源法制的协同优化[J]. *中国石油大学学报(社会科学版)*, 2024, 40(1): 53-62. (Pu Siqian. On the collaborative optimization of legislation of renewable energy under the "dual carbon" goals [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Science)*, 2024, 40(1): 53-62.)
- [4] Liang Shimin, Gao Xuefeng, Wang Gang, et al. Experimental study on operating performances of the low and high temperature stages for cascade air source heat pumps [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 167: 127-136.
- [5] Wu Chunling, Li Xiaofeng, Wang Zhichao, et al. Optimal design strategy of selection and combination to multi-air source heat pump units for central heating[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 145: 177-184.
- [6] 王涵. 空气源热泵阵列“冷湿岛效应”特征及影响研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2024. (Wang Han. Characterization and impact study of "cold and wet island effect" of air source heat punmp array [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2024.)
- [7] 田晓焱, 马广兴, 梁春阳. 严寒地区供暖用空气源热泵机组群热环境模拟[J]. *建筑节能*, 2020(12): 83-88. (Tian Xiaoyan, Ma Guangxing, Liang Chunyang. Simulation on thermal environment of air source heat pump units for heating in severe cold regions [J]. *Building Energy Efficiency*, 2020(12): 83-88.)
- [8] 郭郑道, 许强强, 陈锦鹏, 等. 空气源热泵冷岛效应形成机理及实验验证[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 7-14. (Guo Zhengdao, Xu Qiangqiang, Chen Jinpeng, et al. Formation mechanism and experimental verification of cold island effect of air source heat pumps [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2022, 43(10): 7-14.)
- [9] Li Xiaoyu, Shi Lin, Ma Li, et al. Air flow field testing, simulation and optimization of CO₂ air-source heat pump outdoor unit arrays[J]. *Energy and Buildings*, 2025, 339: 115785.
- [10] 谭庆澎, 刘金平, 陈建勋, 等. 阵列低环温空气源热泵外流场模拟研究[J]. *制冷学报*, 2024, 45(2): 81-93. (Tan Qingpeng, Liu Jinping, Chen Jianxun, et al. External flow field simulation of low ambient temperature air-source heat pump array [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(2): 81-93.)
- [11] 周港. 空气源热泵机组群周围热环境研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022. (Zhou Gang. Study on thermal environment around air source heat pump unit group [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022.)
- [12] Liang Shimin, Wang Han, Bai Xiaoxia, et al. A field study on the impacts of cold island effect on operating performances of air source heat pump array for space heating [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108266.
- [13] Sun Yong, Xu Huixuan, Liu Yang, et al. Technical measures for improving the cold island effect of air source heat pump unit array [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2022, 22 (6) : 2387-2411.
- [14] 马原. 改善空气源热泵机组阵列冷岛效应的技术措施研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021. (Ma Yuan. Study of technical measures to improve the cold island effect of an array of air source heat pump units [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2021.)
- [15] 刘黔奇. 空气源热泵群工作环境模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (Liu Qianqi. Simulation study on working environment of air source heat pump group [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.)
- [16] 雷艳杰, 陈奎. 空气源热泵集群式布置的采暖系统中冷岛效应的产生机理及控制措施[J]. *节能与环保*, 2021 (5) : 51-54. (Lei Yanjie, Chen Kui. The generating mechanism and controlling measures of cold island effect in clustered air-source heat pump heating system [J]. *Energy Conservation and Environmental Protection*, 2021 (5): 51-54.)
- [17] 高学锋. 空气源热泵“冷湿岛效应”交互机制及制热性能损失研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2025. (Gao Xuefeng. Interactive mechanism and heating performance loss study of "cold and wet island effect" of air source heat pumps [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2025.)
- [18] 梁士民, 王哲, 高学锋, 等. 空气源热泵阵列“冷湿岛效应”与结除霜现象相互影响实测研究[J/OL]. *制冷学报*, 1-9 [2025-05-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.tb.20250507.1318.002>. (Liang Shimin, Wang Zhe,

- Gao Xuefeng, et al. Experimental study on the interaction between cold-wet island effect and frosting/defrosting phenomena in air source heat pump arrays[J/OL]. Journal of Refrigeration, 1-9[2025-05-08]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2182.tb.20250507.1318.002>.)
- [19] 邓春芳. 间接测量误差分析及数据处理[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2010, 25(4): 79-81. (Deng Chunfang. Analysis of indirect measurement error and data processing [J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2010, 25(4): 79-81.)
- [20] Zhu Jiahe, Sun Yuying, Wang Wei, et al. A novel temperature-humidity-time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 54: 45-54.
- [21] 王伟, 刘景东, 孙育英, 等. 空气源热泵两种新型高效除霜控制方法的实测研究[J]. 制冷与空调(北京), 2017, 17(3): 66-76. (Wang Wei, Liu Jingdong, Sun Yuying, et al. Field test study of two types of the novel efficient defrosting control methods for air source heat pumps [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2017, 17(3): 66-76.)
- [22] Liang Shimin, Gao Xuefeng, Bai Xiaoxia, et al. A field study on the characteristics of cold and wet island effect of air source heat pump array and its impacts on heating performance [J]. International Journal of Refrigeration, 2025, 179: 457-470.
- [23] Stull R. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(11): 2267-2269.
- [24] Li Zhaoyang, Wang Wei, Sun Yuying, et al. A novel defrosting initiating method for air source heat pumps based on the optimal defrosting initiating time point [J]. Energy and Buildings, 2020, 222: 110064.

通信作者简介

梁士民,男,副教授,青岛理工大学环境与市政工程学院,15066250675, E-mail: liangshimin@qut.edu.cn。研究方向:可再生能源利用、建筑节能、健康睡眠。

About the corresponding author

Liang Shimin, male, associate professor, School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, 86-15066250675, E-mail: liangshimin@qut.edu.cn. Research fields: renewable energy utilization, building energy efficiency, healthy sleeping.

(责任编辑:王亚薇)